

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Caracterización del comportamiento a compresión
simple sobre probetas de tapia

Autor: Isabel Rodríguez Jiménez

Tutor: Mario Solís Muñiz

**Dep. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Caracterización del comportamiento a compresión simple sobre probetas de tapia

Autor:

Isabel Rodríguez Jiménez

Tutor:

Mario Solís Muñiz

Profesor Contratado Doctor

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Grado: Caracterización del comportamiento a compresión simple sobre probetas de tapia

Autor: Isabel Rodríguez Jiménez

Tutor: Mario Solís Muñoz

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Resumen

La tapia, una técnica de construcción con tierra cruda basada en comprimir en capas dicho material con la ayuda de un pisón, remonta a miles de años atrás. La sencillez del proceso de construcción, unido a la accesibilidad de las materias primas y a su bajo coste asocia esta técnica a los países en vía de desarrollo. En la sociedad industrializada, los materiales de construcción evolucionaron ,dejando, en principio, como arcaica dicha técnica milenaria.

Actualmente, parte de la población comienza a sentir inquietudes con respecto a la escasez de recursos naturales en las construcciones además del enorme impacto ambiental que ofrecen materiales utilizados en edificaciones contemporáneas como el hormigón o el acero. Sin embargo, la limitación de investigaciones relacionadas con la técnica de construcción con tapia provoca una retracción a nivel tecnológico, creando cierto temor a la hora de apoyar el resurgir de dicha técnica. Por ello, resulta transcendental cualquier implicación relacionada con la tierra como material de construcción incentivando el mostrar las ventajas que ofrece dicho componente al edificar: es un magnífico aislante térmico y acústico, entre otras virtudes.

Un taller que consistía en el diseño y construcción con tapia de una biblioteca, desarrollado en Extremadura, animaba a la participación y aprendizaje de jóvenes interesados en la arquitectura y la construcción con materiales ligados a bajo impacto ambiental. Este hecho motivó la aparición de esta línea de investigación, asociada a la caracterización del material que utilizarían en dicha obra.

Para lograr dicho objetivo, se realizaron campañas experimentales ligadas a la ejecución de ensayos a distintas probetas fabricadas con la ayuda de moldes, determinando así propiedades características del material tales como: ley de comportamiento, resistencia a compresión simple y módulo de elasticidad.

Abstract

Rammed earth, a construction technique with raw earth based on compress layers of this material using a hand tamper, date back to thousands of years ago. It is extensively associated with developing countries because of the simplicity of the construction process in addition to the accessibility to the raw materials and their inexpensive cost. On the other hand, materials developed in industrialised societies, contributing to the conception of this ancient technique as an archaic one.

Nowadays, an increasing concern for the scarcity of natural resources in constructions along with a special focus on the enormous impact of the materials which are currently used (such as concrete or steel) have arisen. Nevertheless, the lack of research in the fields of the rammed earth technique provokes rejection from a technological point of view, causing a certain degree of apprehension regarding supporting its resurgence. Consequently, a serious commitment with rammed earth as a material and its many advantages (such as its power as an excellent thermal and acoustic insulating, among others) is crucial.

In Extremadura (Spain), a workshop which consisted in the design and construction of a library using the rammed earth technique was conducted. It encouraged young people interested in architecture and construction with low environmental impact materials to participate and learn from this project. Moreover, this fact motivated the appearance of that line of research, related to the necessity of the characterization of the material they would use.

In order to achieve that objective, several experimental campaigns associated with the implementation of tests with various test tubes made with moulds were conducted. These experimental campaigns determined the specific characteristics of the material, including stress-strain curves, simple compressive strength or elasticity modulus.

Resumen	vii	
Abstract	viii	
Índice	ix	
Índice de Tablas	x	
Índice de Figuras	xi	
1	Introducción	1
1.1	Técnicas de construcción con tierra	3
1.2	El desarrollo de la tapia en España	5
1.2.1	El avance de la técnica	6
1.2.2	Ejemplo y motivación del proyecto: construcción en Valverde de Burguillos	8
1.3	Objetivos del presente trabajo	10
2	Estudios previos del material	12
2.1	Ensayos Granulométricos	13
2.1.1	Referencias	13
2.1.2	Elaboración y resultados de los ensayos	14
2.2	Ensayos Próctor Normal	19
3	Procedimiento de fabricación de las probetas	22
3.1	Fabricación de los moldes	22
3.2	Tipos de probetas. Geometría.	23
3.3	Procedimiento de fabricación de las probetas	25
3.3.1	Paso 1. Preparación de la tierra. Mezclado de los componentes.	25
3.3.2	Paso 2. Medición humedad previa y añadido de agua a la mezcla	27
3.3.3	Paso 3. Control de humedad. Medición con horno y mediante medidor de humedad	29
3.3.4	Paso 4. Fabricación de las probetas	32
3.3.5	Paso 5. Curado de las probetas	38
4	Ensayos experimentales	39
4.1	Métodos de medida empleados	42
4.1.1	Bandas Extensométricas	42
4.1.2	Digital Image Correlation (DIC)	43
4.2	Resultados de los ensayos	42
4.2.1	Ensayos de compresión simple sobre probetas cilíndricas	48
4.2.2	Ensayos de compresión simple sobre probetas prismáticas	63
4.3	Ensayos de ultrasonidos	74
4.4	Correlación de resistencia a la compresión con otros parámetros	78
5	Conclusiones	81
Anexo		83
Referencias		94

Índice de Tablas

Tabla 1.1. Cronograma de actividades	11
Tabla 2.1 Porcentaje de áridos en cada dosificación	17
Tabla 2.2 Límites de Atterberg	17
Tabla 3.1. Probetas y porcentajes de humedad obtenidos mediante secado en horno	29
Tabla 3.2 Probetas y porcentajes de humedad obtenidos por calibración de FieldScout TDR-150	31
Tabla 4.1 Probeta ensayada, edad y método de medida utilizado	39
Tabla 4.2. Edad, dimensiones, humedad final y método de medida de cada probeta cilíndrica	48
Tabla 4.3 Valores resistencia a compresión(f_{ck}) y módulo de elasticidad(E) según método de medida: bandas extensométricas y DIC en probetas cilíndricas	61
Tabla 4.5 Edad, dimensiones y método de medida de cada probeta prismática	63
Tabla 4.6. Valores resistencia a compresión(f_{ck}) y módulo de elasticidad(E) según método de medida: bandas extensométricas y DIC en probetas prismáticas	64
Tabla 4.7 Velocidad de ultrasonidos de probetas cilíndricas expresadas en m/s	75
Tabla 4.8 Velocidad de ultrasonidos de probetas prismáticas expresadas en m/s	76

Índice de Figuras

Figura 1.1. Ciudad de Shibam, Yemen	1
Figura 1.2. Mezquita, Moptí (Mali), construida en 1935 con adobe y tapia	2
Figura 1.3. La "rueda de las técnicas" de construcción con tierra	3
Figura 1.4. Pared fabricada con bloques de adobe	4
Figura 1.5. Pared fabricada con tapia. Fachada de biblioteca en Valverde de Burguillos	4
Figura 1.6. Bloques de Tierra Comprimida	5
Figura 1.7. La Tapia en la Península Ibérica	6
Figura 1.8. Ejemplos actuales de encofrados o tapiales	7
Figura 1.9. Pisones tradicionales versus pisón neumático	7
Figura 1.10. Apisonado de la tierra y encofrados utilizados en la obra de Valverde de Burguillos	8
Figura 1.11. Exterior punto de lectura en Valverde de Burguillos	9
Figura 1.12. Interior punto de lectura en Valverde de Burguillos	9
Figura 2.1. Ejemplos de cantidades de grava	14
Figura 2.2. Zahorra estado natural, ZA-25. Dosificación A	15
Figura 2.3. Arena a añadir	15
Figura 2.4. Cantidades en peso de material para cada dosificación	15
Figura 2.5. Granulometría dosificación A	16
Figura 2.6. Granulometría dosificación B	16
Figura 2.7. Granulometría dosificación C	17
Figura 2.8. Granulometría de la mezcla final	18
Figura 2.9. Dosificaciones A,B y C con 8% de humedad	19
Figura 2.10. Molde con tierra compactada para ensayo Próctor Normal	20
Figura 2.11. Muestras seleccionadas colocadas en una urna aislada	20
Figura 2.12. Esquema procedimiento ensayo Próctor Normal	21
Figura 2.13. Resultado ensayo Próctor Normal	21
Figura 3.1. Componentes del molde para probeta prismática sin refuerzos	22
Figura 3.2. Evolución refuerzos para molde de probetas prismáticas	23
Figura 3.3. Dimensiones probetas prismáticas en mm	24
Figura 3.4. Dimensiones probetas cilíndricas en mm	24
Figura 3.5. Dimensiones probetas prismáticas para ensayo a flexión en tres puntos en mm	25
Figura 3.6. Proceso de tamizado de la arena	26
Figura 3.7. Aspecto de la arena tras el proceso de tamizado	26
Figura 3.8. Mezcla final extendida sobre lona	27

Figura 3.9. Procedimiento de medición de humedad con sartén	28
Figura 3.10. Medidor de humedad FieldScout TDR-150	30
Figura 3.11. Fabricación probeta prismática. Compactación y resultado final	33
Figura 3.12. Fabricación probeta cilíndrica	34
Figura 3.13. Fabricación probeta prismática destinada a ensayo a flexión en tres puntos	35
Figura 3.14. Gráfica fuerza frente a distancia de compactación de probetas prismáticas. Con tramo y sin tramo de descarga	36
Figura 3.15. Energía de compactación de probetas prueba prismáticas	36
Figura 3.16. Energía de compactación de probetas prismáticas	37
Figura 3.17. Energía de compactación de probetas cilíndricas	37
Figura 3.18. Energía de compactación de probetas prismáticas destinadas a ensayo de flexión en tres puntos	37
Figura 3.19. Proceso de curado de probetas prismáticas y cilíndricas	38
Figura 3.20. Proceso de curado de probetas prismáticas destinadas a flexión en tres puntos	38
Figura 4.1. Máquina universal de ensayos y técnica de medida DIC	40
Figura 4.2. Bandas extensométricas en probetas cilíndricas	42
Figura 4.3. Banda extensométrica. Marca HBM	43
Figura 4.4. Instrumento de medida ARAMIS Adjustable. Marca GOM	43
Figura 4.5. Proceso de pintado de probeta prismática(P12)	44
Figura 4.6. Correlación de imágenes de una probeta cilíndrica	45
Figura 4.7. Esquema de líneas sobre probeta prismática	45
Figura 4.8. Stage Points y líneas dibujadas sobre probeta cilíndrica (C11)	46
Figura 4.9. Stage Points y líneas dibujadas sobre probeta prismática(P8)	46
Figura 4.10. Métodos de medida utilizados: bandas extensométricas y Digital Image Correlation (DIC)	47
Figura 4.11. Ensayo a compresión simple de una probeta cilíndrica (C9)	48
Figura 4.12. Resistencia a compresión (f_{ck}) de probetas cilíndricas	49
Figura 4.13. Curvas tensión-deformación cara A de probetas cilíndricas según bandas extensométricas	50
Figura 4.14. Curvas tensión-deformación Cara B de probetas cilíndricas según bandas extensométricas	51
Figura 4.15. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C3	52
Figura 4.16. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C4	52
Figura 4.17. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C5	53
Figura 4.18. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C9	53
Figura 4.19. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C3	54
Figura 4.20. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C4	55
Figura 4.21. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C5	55
Figura 4.23. Abarrilamiento de probeta cilíndrica	56
Figura 4.24. Curvas tension-deformación promedio de líneas longitudinales de probetas cilíndricas	56
Figura 4.25. Curvas tension-deformación promedio de líneas transversales de probetas cilíndricas	57
Figura 4.26. Curva tensión-deformación de probeta C3 según bandas extensométricas frente a DIC	57

Figura 4.27. Curva tensión-deformación de probeta C4 según bandas extensométricas frente a DIC	58
Figura 4.28. Curva tensión-deformación de probeta C5 según bandas extensométricas frente a DIC	58
Figura 4.30. Ejemplo comparación de pendientes: recta entre $1/3 f_{ck}$ y $2/3 f_{ck}$ (rojo) y línea de tendencia (azul) para probeta C4	60
Figura 4.31. Módulo de elasticidad (E) de probetas cilíndricas según cara y método de medida	60
Figura 4.32. Ensayo a compresión probeta prismática P19	62
Figura 4.33. Resistencia a compresión (f_{ck}) simple de probetas prismáticas	63
Figura 4.34. Módulo de elasticidad (E) de probetas prismáticas según cara y método de medida	63
Figura 4.31. Módulo de elasticidad (E) de probetas cilíndricas según cara y método de medida	60
Figura 4.32. Ensayo a compresión probeta prismática P19	62
Figura 4.33. Resistencia a compresión (f_{ck}) simple de probetas prismáticas	63
Figura 4.34. Módulo de elasticidad (E) de probetas prismáticas según cara y método de medida	63
Figura 4.35. Curvas tensión-deformación según bandas extensométricas de probetas prismáticas	64
Figura 4.36. Curvas modificadas tensión-deformación según bandas extensométricas de probetas prismáticas	65
Figura 4.37. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P8	66
Figura 4.38. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P10	66
Figura 4.39. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P12	67
Figura 4.40. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P17	67
Figura 4.41. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas transversales de P8	68
Figura 4.42. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas transversales de P10	69
Figura 4.43. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas transversales de P12	69
Figura 4.44. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas transversales de P17	70
Figura 4.45. Curvas tension-deformación promedio de líneas longitudinales de probetas prismáticas	71
Figura 4.46. Curvas tension-deformación promedio de líneas transversales de probetas prismáticas	71
Figura 4.47. Curvas tensión-deformación de probeta P8 según bandas extensométricas frente a DIC	72
Figura 4.48. Curvas tensión-deformación de probeta P10 según bandas extensométricas frente a DIC	72
Figura 4.49. Curvas tensión-deformación de probeta P12 según bandas extensométricas frente a DIC	73
Figura 4.50. Curvas tensión-deformación de probeta P12 según bandas extensométricas frente a DIC	73
Figura 4.51. Componentes necesarios para ensayo de ultrasonidos	74
Figura 4.52. Direcciones de medición de velocidades de ultrasonidos	75
Figura 4.53. Gradiente de velocidades de ultrasonidos, de mayor a menor (según flecha)	77
Figura 4.54. Correlaciones resistencia a compresión frente humedad inicial y final en probetas prismáticas	78
Figura 4.55. Correlaciones resistencia a compresión frente velocidad ultrasonidos dirección de compactación(izquierda) y dirección transversal(derecha) en probetas prismáticas	78
Figura 4.56. Correlación resistencia a compresión frente energía de compactación en probetas prismáticas	79
Figura 4.57. Correlación resistencia a compresión frente humedad final en probetas cilíndricas	79

Figura 4.58. Correlaciones resistencia a compresión frente velocidad ultrasonidos dirección de compactación(izquierda) y dirección transversal(derecha) en probetas cilíndricas	80
Figura 4.59. Correlación resistencia a compresión frente energía de compactación en probetas cilíndricas	80
Figura 6.1. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C3	84
Figura 6.2. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C3	84
Figura 6.3. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C4	84
Figura 6.4. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C4	85
Figura 6.5. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C5	85
Figura 6.6. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C5	85
Figura 6.7. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C9	86
Figura 6.8. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C9	86
Figura 6.9. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C11	86
Figura 6.10. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C11	87
Figura 6.11. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de CP2	87
Figura 6.12. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de CP2	87
Figura 6.13. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P5	88
Figura 6.14. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P5	88
Figura 6.15. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P8	88
Figura 6.16. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P8	89
Figura 6.17. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P10	89
Figura 6.18. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P10	89
Figura 6.19. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P11	90
Figura 6.20. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P11	90
Figura 6.21. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P12	90
Figura 6.22. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P12	91
Figura 6.23. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P15	91
Figura 6.24. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P15	91
Figura 6.25. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P17	92
Figura 6.26. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P17	92
Figura 6.27. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P19	92
Figura 6.28. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P19	93

1 INTRODUCCIÓN

La necesidad de la vivienda para nuestros antepasados fue algo vital con el paso al sedentarismo. El inicio se remonta a los principios de las historias de las ciudades. Datan de 10.000 años atrás donde en Mesopotamia se edificaron las primeras aglomeraciones urbanas con tierra cruda. Este material era fácilmente accesible y permitía la construcción de sus viviendas.

La resistencia y robustez que ofrecían dichas construcciones convenció a los emperadores de China ya que decidieron utilizar la tierra como material principal para una de su construcción más emblemática y que aún hoy persiste: La Gran Muralla China. Inicialmente, casi en su totalidad, con tierra apisonada (tapia) y más adelante cubierta con piedras naturales y ladrillos dándole la apariencia de muralla de piedra.

Merecen ser señaladas por este tipo de construcciones zonas como Chan-Chan (Perú), una ciudad de 20 km² construida totalmente con tierra, en especial con la técnica del adobe y la ciudad de Shibam, en Yemen, declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, siendo uno de los ejemplos que logra distinguirse por sus inmensos rascacielos de hasta dieciséis plantas utilizando materiales tan básicos y arcaicos como la tierra mezclada con agua. En Andalucía nos encontramos con un edificio candidato a ser una de las ocho maravillas del mundo como es la Alhambra de Granada, construida prácticamente en su totalidad con la técnica de la tapia.

Cuatro ejemplos pretéritos en cuatro continentes distintos: Asia, America, África y Europa.



Figura 1.1. Ciudad de Shibam, Yemen

Actualmente se estima que alrededor del 30% de la humanidad habita en viviendas de tierra. Siendo Perú, con el 50% de su población, el máximo exponente. Existen infinidad de muestras por todos los continentes, desde las regiones más frías y lluviosas como Dinamarca y Alemania, hasta zonas desérticas y cálidas como el Sáhara y África, lo que hace intuir sus sobresalientes ventajas. Su capacidad como aislante térmico y acústico acompañado de su resistencia al fuego son características destacables y que cada vez más consigue que la tierra tenga un gran atractivo constructivo. A todo lo anterior se une el bajo impacto ambiental asociado a los métodos de construcción suponiendo un enorme ahorro energético, reduciendo las emisiones de CO₂ que aparecen en otros materiales convencionales.



Figura 1.2. Mezquita, Moptí (Malí), construida en 1935 con adobe y tapia

Es cierto que donde las técnicas de construcción con tierra son empleadas con mayor profusión es en aquellos países en vía de desarrollo o con pocos recursos, donde la construcción con tierra cruda se encuentra en plena vigencia y que gracias a la posibilidad de autoconstrucción por los sencillos procesos asociados a las distintas técnicas además de la abundancia y disponibilidad de dicho material, los habitantes de estos países consiguen mejorar y enriquecer sus vidas.

Poco a poco, y aunque estos métodos de construcción en los países desarrollados se encontraban en decadencia, a finales del pasado siglo, se comienza a creer en lo factible que puede llegar a ser un material como la tierra en un mundo industrializado preocupado por los graves problemas medioambientales.

Se conoce que aunque gran cantidad de cualidades se encuentran en la tierra como material de construcción, existen desventajas que limitan las construcciones como la vulnerabilidad ante el agua, generando un efecto erosivo disminuyendo las propiedades mecánicas del material a gran escala o la debilidad sísmica por su reducida resistencia a tracción. Estos grandes problemas son algunos de los causantes de la anteposición de otros materiales constructivos como el ladrillo o el hormigón provocando que la tierra como material de construcción entrara en decadencia.

1.1 Técnicas de construcción con tierra

Existe una gran variedad de técnicas de construcción con tierra cruda. A continuación, se muestra un esquema en forma de rueda con doce sectores representando distintas técnicas diferenciadas según la plasticidad del material conforme a la aplicación en obra: húmedo, plástico, sólido y líquido.

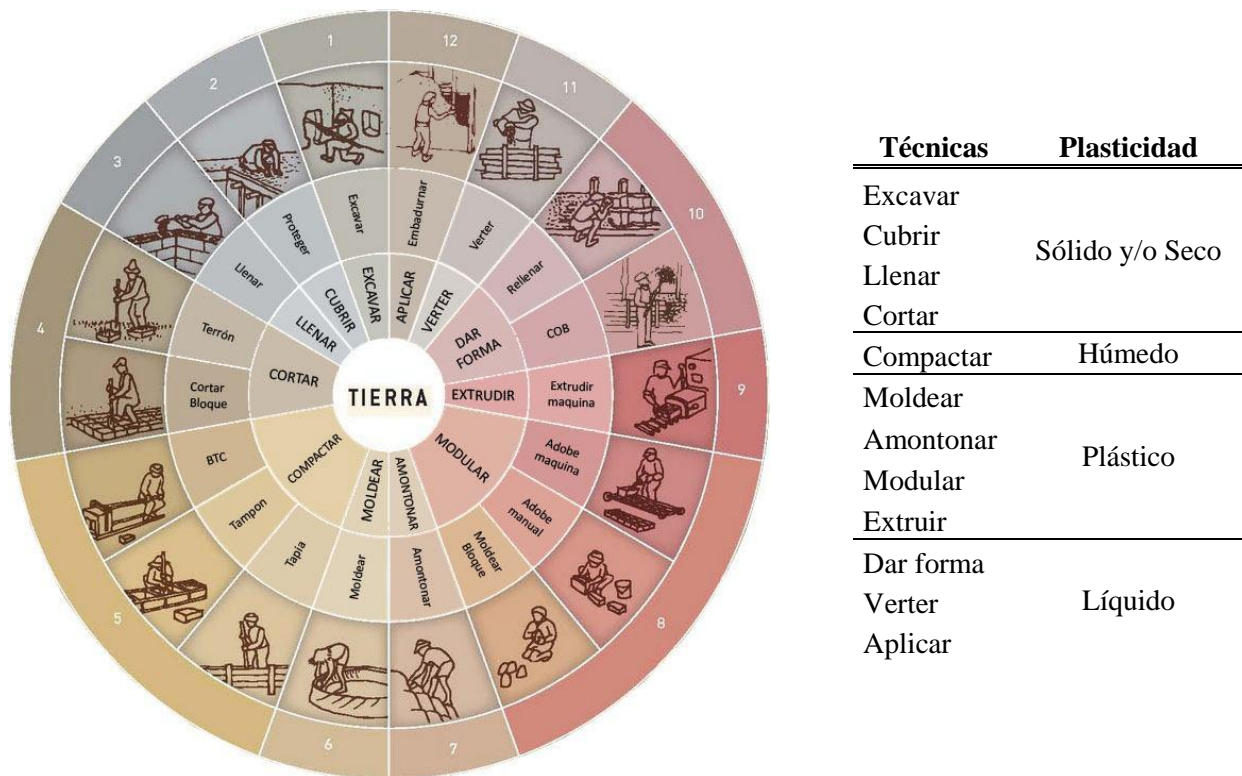


Figura 1.3. La "rueda de las técnicas" de construcción con tierra

Dentro de todas las técnicas destacaremos tres: el Adobe, la Tapia y el BTC ya que son las más evolucionadas en nuestro país. Dos de ellas, el Adobe y la Tapia están siendo investigadas en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla.

Adobe

El adobe es un bloque formado por una masa de mezcla sin cocer. Dicha mezcla se fabrica con arena, arcilla y agua aunque generalmente, para evitar que se agriete al secarse debido a la retracción, se le suele añadir paja. Estos bloques se dejan secar al sol proporcionando resistencia a la mezcla. Las dimensiones suelen ser las adecuadas para que el albañil pueda manejarlo con facilidad, aproximadamente de 10*24*34 cm.



Figura 1.4. Pared fabricada con bloques de adobe

Tapia

Esta técnica consiste en la compactación de tierra húmeda en el interior de un molde distribuida en capas o tongadas de 10 a 15 cm. Cada una de estas capas se apisona in situ con un pisón de formar manual. En la actualidad se utilizan vibradores para aligerar el proceso. La tierra apisonada fue conocida durante siglos como técnica tradicional de construcción de muros en todos los continentes del mundo es por este motivo que la técnica del tapial o "rammed earth" en inglés se define como tierra amasada y compactada en un encofrado para formar muros monolíticos. El encofrado tradicional está compuesto por dos tablonos paralelos separados y unidos por un travesaño. Este armazón se ha ido sofisticando a lo largo de los años y gracias a la experiencia se ha llegado incluso a conseguir encofrados sin travesaños intermedios.

Debido a que durante el procedimiento se utiliza un menor nivel de agua que en el adobe, a rasgos generales, proporciona una buena resistencia y a su vez menor retracción.



Figura 1.5. Pared fabricada con tapia. Fachada de biblioteca en Valverde de Burguillos

La arquitectura de la tapia posee un indiscutible valor dentro de la cultura constructiva de la Península Ibérica tanto por su remoto origen como por su nivel tecnológico, su estado de conservación y su increíble adecuación al medio natural.

BTC

La tierra utilizada para la fabricación de BTC o Bloques de Tierra Comprimida es una mezcla arena, limo y arcilla compactada en una prensa manual. Según Gernot Minke [2] la tierra con una óptima distribución granulométrica para elaborar un BTC es aquella formada por 64% de arena, 22% de limo y 14 % de arcilla. Tiene un aspecto muy similar al adobe ya que se fabrican en forma de bloques, sin embargo, la tierra con la que se fabrican los bloques de BTC es ligeramente humedecida y prensada para conseguir dar la consistencia de la tapia pero del tamaño de un bloque, consiguiendo facilitar la puesta en obra.



Figura 1.6. Bloques de Tierra Comprimida

1.2 El desarrollo de la tapia en España

En España, está documentado el uso de tierra cruda como elemento constructivo desde la más remota antigüedad. El escritor Plinio en su obra Historia Natural (77 d.C) ya nombra el uso de la tapia en construcción de torres en España. Además, un gran porcentaje de iglesias o murallas que han llegado hasta nuestras fechas han sido construidas con este material. Edificios tan importantes como la Alhambra de Granada o el centro histórico de Córdoba son ejemplos significativos de construcción con tierra cruda en nuestro país.

A principio de los años ochenta se conoce que en Europa, después de la crisis energética, gran parte de la población sintió una preocupación con respecto a la escasez de recursos naturales existentes en el planeta. Asociado a ello, distintos expertos relacionados con la arquitectura y la construcción consideraron apropiado rescatar materiales y antiguas técnicas constructivas. De forma más tardía, en España, ha surgido este movimiento logrando que en los últimos 20 años existan gran cantidad de estudios, investigaciones y construcciones como edificios públicos o viviendas construidas a base de tierra. En 1983 el ingeniero Juan Salas Serrano funda en el Instituto Eduardo Torroja el equipo de investigación "Tecnologías de vivienda de Muy Bajo Coste" dando un gran paso y animando a cantidad de profesionales a seguir el camino de la investigación de este tipo de construcción.



Figura 1.7. La Tapia en la Península Ibérica [3]

La carencia de soporte normativo provoca en España un obstáculo a la hora de avanzar e impulsar la construcción con tierra sin cocer. A las tradicionales técnicas de adobe y tapia se les unió en los años cincuenta del siglo pasado el ya nombrado BTC o "Bloque de Tierra Comprimida" y asociado a esta técnica llegó la aprobación en el año 2008 de la norma **UNE 41410:2008: Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques**, considerándose un avance sustancial. Actualmente se encuentra en elaboración la norma UNE sobre la construcción con tapia.

1.2.1 El avance de la técnica

De forma tradicional el proceso de **preparación** de la tapia era completamente manual, apartando guijarros que se consideraran mayores de 20 mm y deshaciendo los terrones si la tierra se consideraba arcillosa. Para comprobar si el grado de humedad era correcto se tomaba una porción de mezcla con la mano y se apretaba, si no se adhería a esta al abrirla y conservaba la forma, podía considerarse correcto.

Aunque se considere una técnica arcaica, la experiencia consigue que aún hoy existan algunas edificaciones construidas con este procedimiento. Si bien, los métodos se han ido desarrollando utilizando excavadoras ligeras para conseguir que el material se vuelva más homogéneo. Además para alcanzar mejores cualidades se lleva a cabo una granulometría previa de la tierra a utilizar, realizando así correcciones si fuese necesario. Posteriormente, tras homogeneizar el material, se le añade de manera controlada el agua necesaria que difícilmente superará el 10% en peso.

Para conseguir mejorar la estabilidad, resistencia y plasticidad de la mezcla, se practica la **estabilización** desde bien antiguo. Actualmente en España el más utilizado es el cemento aunque destinar cal aérea para suelos arcillosos resulta incluso más apropiado.

Trabajar con tierra ofrece unos magníficos **acabados**, proporcionando unas atractivas texturas relacionadas con la simplicidad de las superficies conseguidas. Es por ello que en la mayoría de los casos se optan por muros totalmente vistos, generando en España, en la actualidad, una experimentación asociada a la aplicación de sustancias hidrófugas como tratamientos superficiales.

A mediados del siglo pasado se introdujeron mejoras con respecto a los **encofrados** o **tapiales** empezando a sustituir los tradicionales por aquellos que procedían de la industria del hormigón que propician la obtención de grandes muros, evitando las reiteradas operaciones de montaje y desmontaje que exigían los tradicionales.



Figura 1.8. Ejemplos actuales de encofrados o tapiales

En base a la experiencia y gracias a los más veteranos del sector se confeccionaban los **pisones** de madera dura, seca y resistente con las dimensiones que procedían de la tradición, cumpliendo siempre los requisitos de funcionalidad y manejo exigidos. Aunque este tipo de pisones funcionaban, la técnica en conjunto fue desarrollándose y mejorando en todos los aspectos, arrastrando con ella el uso de este tipo de pisón y colocando los sistemas mecánicos como primera opción. Con ello se logra un menor esfuerzo aumentando al mismo tiempo los rendimientos y el grado de compactación.

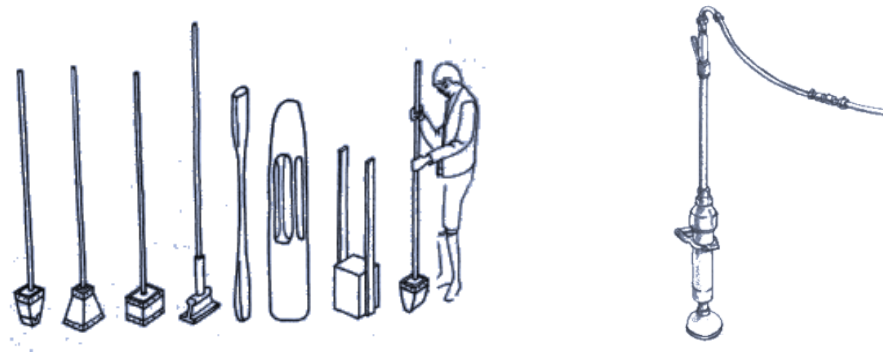


Figura 1.9. Pisones tradicionales versus pisón neumático

Con el uso de pisones mecánicos, la forma de **verter la tierra** en el tapial también evolucionó, pasando de elevar espuelas con la ayuda de una polea generando ritmos de compactación lentos a emplear maquinaria de carga y elevación.

1.2.2 Ejemplo y motivación del proyecto: construcción en Valverde de Burguillos

Todo el trabajo aquí expuesto cuenta como motivación el vínculo con un proyecto de un punto de lectura construido en base a la técnica tradicional de la tapia en Valverde de Burguillos, Badajoz. Debido a la necesidad de caracterizar el material con el que se trabajó en dicha obra se realizaron los ensayos correspondientes tanto en la Escuela Superior de Ingeniería como en la Escuela Superior de Arquitectura de Sevilla, considerando aportar datos técnicos para la fábrica de tapia que se conformó en la edificación prevista.

Este proyecto fue promovido por Building Impact Zero Network considerado como una red europea de organizaciones especializadas en técnicas de construcción de bajo impacto ambiental y con la participación de la asociación Dehesa Tierra de Extremadura quienes nos invitaron a conocer el proyecto desde dentro y así aportar los conocimientos obtenidos gracias a los distintos estudios realizados en nuestro laboratorio.



Figura 1.10. Apisonado de la tierra y encofrados utilizados en la obra de Valverde de Burguillos

El taller consistía en la construcción de una pequeña biblioteca en el área pública de la piscina municipal de Valverde de Burguillos que cuenta con una superficie aproximada de 30 m^2 . En dicha obra se empleó la tierra denominada ZA-25 y arena gravosa disponibles en el laboratorio que se analizarán en el punto siguiente. Estos materiales conformaron los muros apisonando la proporción formada por 13 kg de tierra y 4 kg de arena. Para aligerar el proceso y conseguir un buen ritmo de trabajo se ayudaron de un mezclador eléctrico vertical.

Esta obra contaba con unos encofrados realizados in situ mostrados en la figura 1.10 y los pisones fueron fabricados considerando ante todo la maniobrabilidad y la ligereza de sus componentes para facilitar el trabajo a los participantes. La fachada se comenzó con piedra para evitar los problemas relacionados con el agua, como la posible capilaridad, y se continuó con un muro de aproximadamente 1,5 metros de altura con tongadas o tapiadas de mezcla de tierra previamente húmeda. Se procuró, aunque en este caso a ojo, que la humedad existente fuese la obtenida en el ensayo Próctor normal realizado en el laboratorio y descrito en el apartado 2.2 del presente trabajo.



Figura 1.11. Exterior punto de lectura en Valverde de Burguillos



Figura 1.12. Interior punto de lectura en Valverde de Burguillos

1.3 Objetivos del presente trabajo

Las ventajas de trabajar con un material tan sencillo y fácilmente de obtener como es la tierra son claras: su impacto ambiental es prácticamente nulo y permite el levantamiento de viviendas de manera autoconstructiva ayudando así a los países más necesitados. Por esta razón, entre muchas otras, distintas ramas de estudio relacionadas con la tierra como material de construcción se encuentran en auge en todo el mundo recalcando las cualidades relacionadas con este material.

El esfuerzo a compresión es, al que en mayor medida se encuentran sometidas la infinidad de edificaciones construidas. A pesar de ello, no existe normativa española estandarizada vinculada a la realización de ensayos a este tipo de material. En consecuencia, además del impulso vinculado por la necesidad de caracterizar el material que fue utilizado en un proyecto real, la construcción de un punto de lectura en la localidad de Valverde de Burguillos en Badajoz, se promovió esta línea de investigación junto con mi compañero, estudiante de Ingeniería Aeroespacial en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Jose Luís Bocanegra Cerrada, trabajando con nuestras manos en el confeccionado de las probetas y ensayando este material a distintos esfuerzos. Se realizaron ensayos a compresión simple, ensayos a tracción indirecta y ensayos de flexión en tres puntos.

La campaña experimental comenzó con la selección de la tierra a utilizar, tanto en las probetas como en la obra, gracias a estudios previos basados en ensayos granulométricos y ensayos Próctor Normal de distintas dosificaciones realizados en la Escuela Técnica de Arquitectura de Sevilla. Seguidamente, se procedería, en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Sevilla, a la fabricación de las probetas: veinte prismáticas, diez cilíndricas y ocho probetas prismáticas con una longitud mayor que las anteriores. Para ello fue necesaria la confección de moldes de madera para la fabricación de los dos tipos de probetas prismáticas.

Completando este proyecto, se realizaron ensayos a compresión simple a probetas tanto prismáticas de menor tamaño como cilíndricas. Se utilizaron dos técnicas de medida distintos: bandas extensométricas y correlación de imágenes digitales(DIC), todo un avance en la tecnología para la obtención de deformaciones y desplazamientos.

Con estos ensayos se persigue obtener algunas propiedades relacionadas con el material como la resistencia a compresión simple, f_{ck} y el módulo de elasticidad, E , obtenidos a partir de la ley de comportamiento tensión(σ)-deformación(ϵ) ofrecida por ambos métodos de medida, llevándose a cabo una comparativa de estos resultados.

<u>Semana 1</u> 19/02-23/02	Selección de dosificaciones Ensayo Próctor Normal
<u>Semana 2</u> 26/02-02/03	Ensayo Granulométrico Prueba Ultrasonidos
<u>Semana 3</u> 5/03-9/03	Preparación mezcla para probetas
<u>Semana 4</u> 12/03-16/03	Calibración TDR-150
<u>Semana 5</u> 9/04-13/04	Preparación moldes para probetas prismáticas
<u>Semana 6</u> 23/04-27/04	Pruebas a moldes y mejoras Visita obra de Valverde de Burguillos
<u>Semana 7</u> 30/04-04/05	Definición protocolo fabricación probetas (Pruebas, energía de compactacion...)
<u>Semana 8</u> 07/05-11/05	Cribado tierra. Obtención de la mezcla final Fabricación de probetas Medida de humedad de fabricación
<u>Semana 9</u> 14/05-18/05	Fabricación probetas prismáticas y cilíndricas
<u>Semana 10</u> 21/05-25/05	Prueba de moldes probetas flexión
<u>Semana 11</u> 28/05-1/06	Fabricación probetas flexión
<u>Semana 12</u> 18/06-22/06	Medida ultrasonidos Instalación bandas extensométricas Pruebas de ensayos a compresión y tracción
<u>Semana 13</u> 25/06-29/06	Ensayos a compresión simple Ensayos a tracción indirecta

Tabla 1.1. Cronograma de actividades

2 ESTUDIOS PREVIOS DEL MATERIAL

Para introducirnos en el mundo de la tapia es necesario conocer todos los componentes que dentro del material se incluyen. Es curioso y destacable que este material incluso antes de ser usado para la construcción, se encuentra en forma natural, sin apenas modificación, vertiéndose así a los encofrados o tapiales, apisonándolo con el fin último de conseguir que mantenga su forma al separarlo del molde. Para ello simplemente es necesaria **tierra**, agua, el tapial y el pisón como ingredientes básicos. Es cierto que dentro de esta receta se pueden incluir otros elementos que no son imprescindibles y que en nuestro caso no se tendrán en cuenta. Son materiales muy utilizados para conseguir, por ejemplo, estabilizar la mezcla como son la cal o el cemento.

La **tierra** referida anteriormente es aquella que está formada básicamente por arcilla, limo, arena, y en muchas ocasiones también grava, siendo todos ellos materiales que se encuentran de forma abundante y accesible en cualquier zona de nuestro país. Dependiendo de la proporción y calidad de cada uno de estos elementos se conseguirán distintas propiedades tanto mecánicas como físicas.

Según el Sistema Unificado de Clasificación de los Suelos (SUCS), los componentes de nuestra tierra podrán clasificarse según el tamaño de partícula que contiene. De esta manera:

- **GRAVA**: partículas entre 4,76 y 75 mm
- **ARENA**: partículas entre 0,075 y 4,76 mm
- **LIMO**: partículas entre 0,002 y 0,075 mm
- **ARCILLA**: partículas menores de 0,002 mm

Todos estos elementos combinados entre sí conforman por lo regular la tierra usada para la construcción con tapia. El material que destacaremos como protagonista ya que aporta la cohesión entre partículas será la **arcilla**. Esta actúa como aglomerante para fijar las distintas partículas de mayor tamaño de la misma forma que el cemento actúa en el hormigón.

La arcilla la conforma una serie de partículas minerales muy finas, especialmente sílice y alúmina que por su particular forma en escamas cuenta con una peculiar naturaleza superficial. Posee la capacidad de retener el agua, impidiendo que el aire penetre en estos espacios al estar saturado con la misma. Brinda *la plasticidad*, su principal propiedad, permitiendo amplias posibilidades de manejo. Gracias a la plasticidad de la arcilla, es decir, a la capacidad que tiene una porción de arcilla, previamente mojada, al ser apretada, de deformarse, conseguiremos una mejor o peor deformabilidad y adaptabilidad del material en conjunto. Esta propiedad será caracterizada por el **límite plástico**.

Al ir añadiendo agua, llegará a un extremo en que la arcilla dejará de ser cohesiva. Es lo que denominaremos **límite líquido** considerándose otro valor que caracterizará nuestra tierra. Debido al endurecimiento de la arcilla a causa de la pérdida del agua de su interior, se conseguirá una unión más íntima entre partículas consiguiendo una fuerte cohesión de la masa arcillosa.

Las propiedades nombradas anteriormente son de un gran interés para nuestro objetivo, la construcción en tapiales. Lo habitual es que, si queremos conseguir un muro bien trabajado, la tierra ha de contener una cierta proporción de arcilla que se ocupará de unir las diferentes partículas dentro de la tierra, proporcionando, tras una adecuada compactación, que el muro obtenga un comportamiento mecánico correcto para su función y pueda ofrecer la resistencia suficiente ante los esfuerzos a los que será sometido. De hecho, la correcta proporción de arcilla es primordial ya que una excesiva cantidad puede provocar una retracción no deseada en la pieza compactada al secarse, seguido de la aparición de grietas o la adherencia de la mezcla a las tablas del encofrado. Este problema puede llegar a provocar la separación de las capas superficiales al desenconfrar.

Para minimizar los problemas comentados es primordial limitar la cantidad de arcilla sustituyéndola por **arena**, elemento poco plástico. Los granos de arena se intercalan entre las partículas de arcilla reduciendo la retracción y la adherencia a las paredes del tapial. No obstante, una carencia excesiva de arcilla provocaría una falta de cohesión tras la compactación de la tierra. Se debe de conseguir un correcto equilibrio referido a la cantidad de arcilla frente al resto de elementos incluyendo el agua que ofrezca las mejores propiedades para la construcción con tierra que nos ocupa.

Combinado con los elementos anteriores, la grava proporciona una resistencia del mismo modo que actúa en el hormigón, sin embargo, no aporta ninguna cohesión.

En resumen, es totalmente sustancial una correcta proporción de los componentes que constituyen la tierra que será utilizada. El objetivo se basa en rellenar huecos que van dejando partículas de tamaño superior, es decir, los huecos dejados por la grava, la arena debe de ocuparlos y del mismo modo con los limos y las arcillas, consiguiendo así una curva granulométrica continua y equilibrada.

Para ello y con el fin de conseguir una proporción lo más adecuada posible para el tipo de construcción que se pretende llevar a cabo se realizaron ensayos granulométricos a tres tipos de dosificaciones distintas.

2.1 Ensayos Granulométricos

2.1.1 Referencias

El análisis granulométrico se realizó según los pasos indicados en la norma **UNE 103:101:1995**(AENOR 2002): *Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado*. En concreto lo que se buscó fue conseguir una mezcla adecuada basada en referencias de autores especializados en la construcción con tierra además de la experiencia unida al conocimiento ofrecido por uno de los miembros de la asociación TAPH TAPH, dedicados al fomento de la bioconstrucción, ya que no existe una norma vigente que detalle estos parámetros. Para ello se modificó la granulometría original, añadiendo arena y arcilla para cubrir los huecos existentes entre tanto árido grueso que ofrecía la tierra natural existente. Así se consigue mejorar la cohesión y el comportamiento ante la construcción con dicho material.

En la actualidad existen distintas referencias basadas en investigaciones de autores con gran experiencia. En España, el Piet-70, del Instituto Eduardo Torroja, en las *Prescripciones sobre Obras de Fábrica* ofrece los siguientes valores:

- GRAVA: 10-20 %
- ARENA: 10-40%
- LIMO: 20-40%
- ARCILLA : 10-40%

Además se advierte que el contenido de arcilla/limo no debe superar el 45% del total.

Los valores recomendados, según Standards Australia, 2002 [5]:

- GRAVA-ARENA: 45-75%
- LIMO: 10-30%
- ARCILLA: >20%

Otros autores como Bauluz y Barcena [6] o el libro *Construire en terre* [10] ofrecen curvas granulométricas de referencia, tanto los límites superiores e inferiores así como la curva ideal. Del gráfico se deduce que según la curva ideal los porcentajes de cada componente deberían ser:

- GRAVA: 18%
- ARENA: 40%
- LIMO: 22%
- ARCILLA 20%

Existen distintos pensamientos y variaciones significativas entre autores. Si realizamos una recopilación de datos, se observa que los porcentajes de cada componente oscilan entre los siguientes valores:

- GRAVA: 10-75%
- ARENA: 20-40%
- LIMO: 10-30%
- ARCILLA: 10-20%

Es cierto a su vez, que los autores mencionan que son solamente orientaciones y que, si los valores obtenidos se encontrasen dentro de esos rangos, en la mayor parte de los casos ofrecen resultados satisfactorios, aunque existen tierras que muestran un comportamiento eficiente a pesar de no encontrarse en los intervalos anteriores.



Figura 2.1. Ejemplos de cantidades de grava

2.1.2 Elaboración y resultados de los ensayos

Para la ejecución de los ensayos se adquirió un suelo denominado ZA-25, que fue suministrado por Hormigones Hermanos Fernández S.L, una empresa dedicada a la explotación de áridos. Este fue el material que consideramos de inicio a partir del cual se buscó conseguir una mejor dosificación añadiéndole arena y arcilla para enriquecer la falta de finos.

Dicho material muestra a simple vista un aspecto donde predomina un árido grueso con tamaño de partícula excesivo. Es por ello que se realizó una criba previa con un tamiz de 20 mm, para conseguir una granulometría equilibrada eliminando el exceso de grava. Presenta un color amarillento rojizo con los cantos angulares lo que implica que posee un recorrido de vida corto y que fue obtenido por voladura con explosivos.

A dicho suelo con grandes partículas se le añadió una arena clasificada como "arena gravosa" con un aspecto grisáceo que deja residuo polvoriento en las manos al tocarla. Por esa razón se dedujo que posee gran cantidad de partículas finas además de por su apreciación a simple vista. Para evitar el paso de grava, toda la arena utilizada denominada SG se cribó en un tamiz de 2 mm.



Figura 2.2. Zahorra estado natural, ZA-25. Dosificación A



Figura 2.3. Arena a añadir

Una vez fueron preparados los materiales, se comenzó la fase de ensayos. Para su desarrollo en el laboratorio se decidió analizar granulométricamente tres dosificaciones distintas. La mezcla nombrada como A fue aquella formada por un total de 10 kg de tierra ZA-25 en estado natural. La segunda dosificación(B) estaba formada por 9 kg de suelo ZA-25 y 1 kg de arena SG mientras que la tercera dosificación(C) se realizó con 9 kg de ZA-25 nuevamente, añadiéndole 2 kg de arena, es decir, una relación 9/2 en peso.

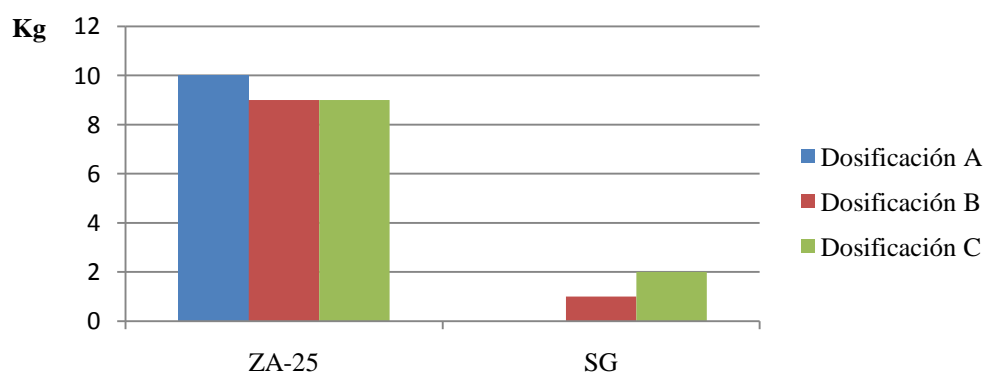


Figura 2.4. Cantidades en peso de material para cada dosificación

Según cuál sea el componente predominante hablaremos de suelos arcillosos, limosos, arenosos o gravosos. En nuestro caso, según los resultados obtenidos, se pueden considerar todas las dosificaciones como **arenas arcillosas**, algo que resulta favorable ya que a rasgos generales se persigue para este tipo de construcción que no sea ni muy arcillosa ni con demasiada escasez de este material.

Para la realización de los ensayos de estas mezclas o dosificaciones se utilizaron los siguientes tamices normalizados según la **UNE 7050-2:97** disponibles en el laboratorio: 12.5, 10, 6.3, 5, 2, 4.25, 0.4, 0.16, 0.08(mm). Seguidamente se ejecutó una granulometría por sedimentación según la norma **UNE 103 102:1995: Análisis de suelos finos por sedimentación**, para conocer la cantidad de finos que se encontraba en cada una de las muestras.

Las curvas granulométricas obtenidas de las distintas dosificaciones son las mostradas a continuación. Junto a dichos gráficos aparecen tres curvas de referencia que representan la curva ideal(azul), el límite superior(naranja) y el límite inferior(verde) que según los autores de *Construire en terre* reproducen los intervalos de tamaño de partícula asociados a la técnica de construcción protagonista: la tapia.

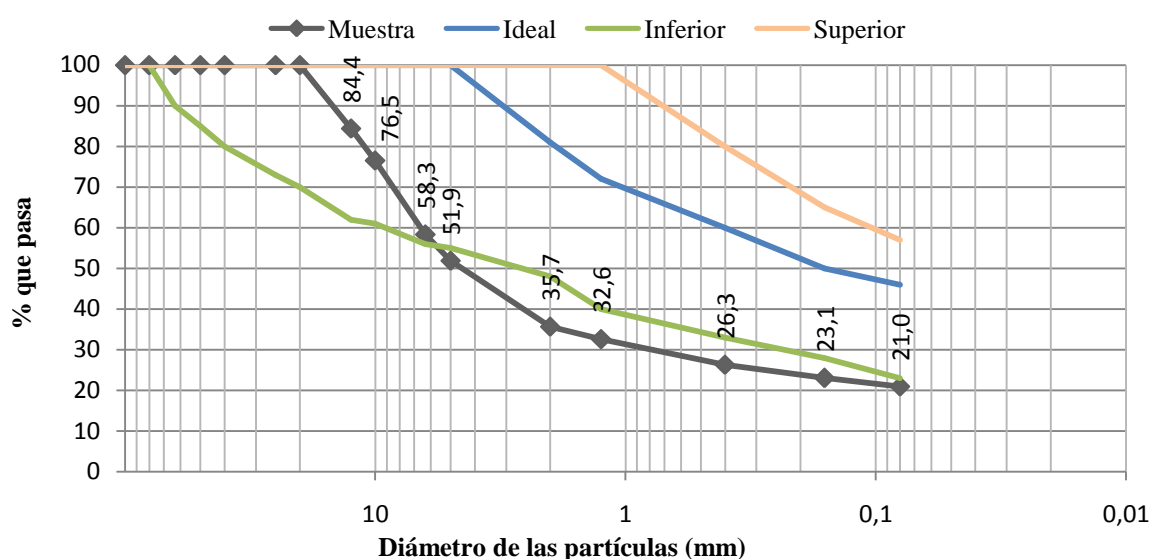


Figura 2.5. Granulometría dosificación A

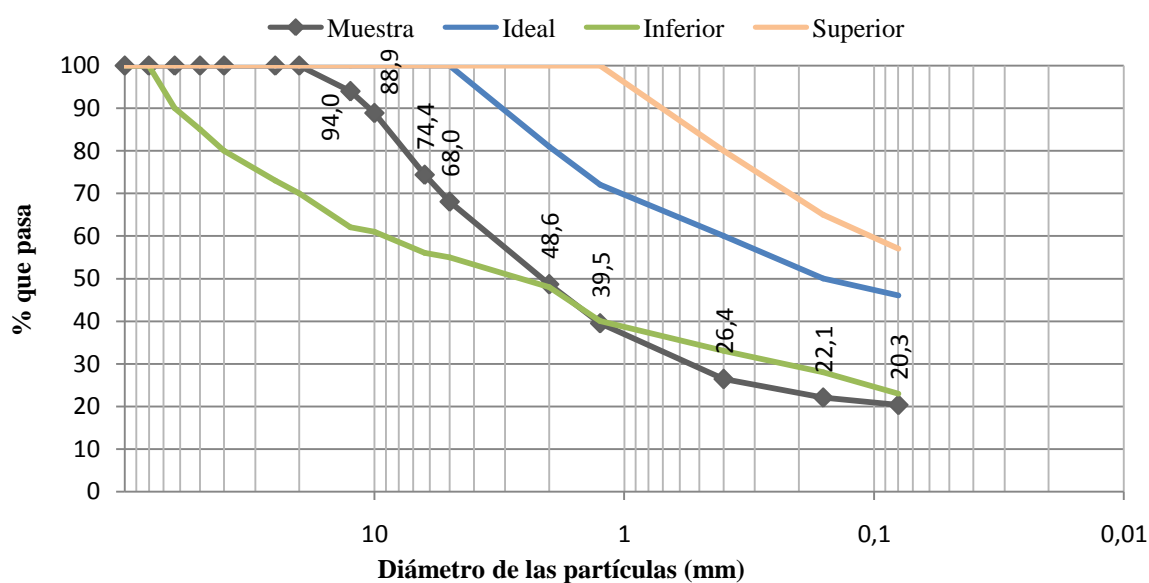


Figura 2.6. Granulometría Dosificación B

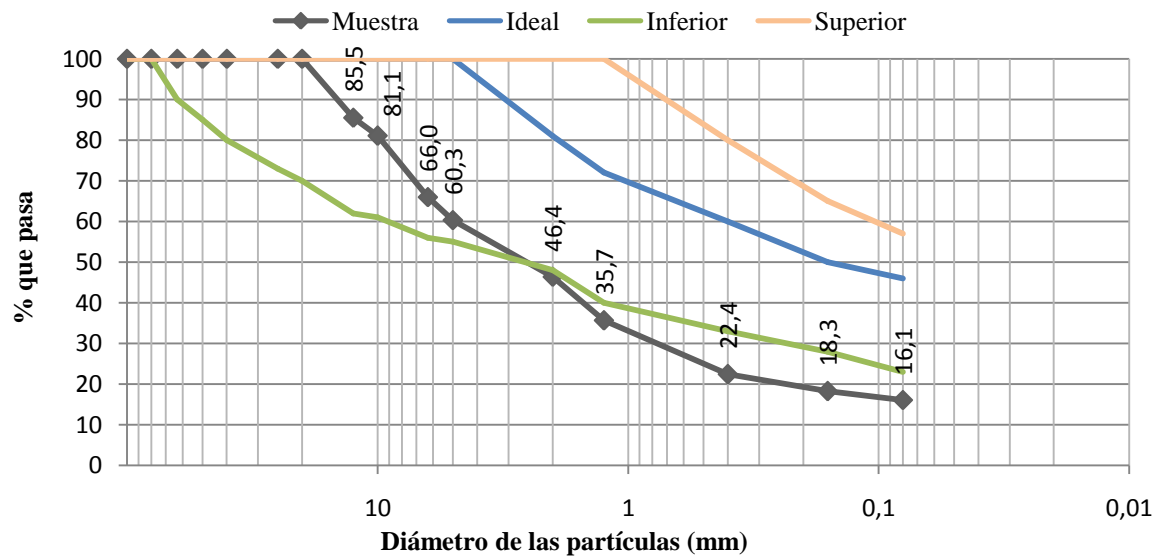


Figura 2.7. Granulometría Dosificación C

Dosificación	A	B	C
% Grava	64,29	51,36	53,61
% Arena	14,76	28,33	30,32
% Finos	20,95	20,31	16,07

Tabla 2.1. Porcentaje de áridos en cada dosificación

Límites de Atterberg	
Límite Líquido (LL)	30,30%
Límite Plástico (LP)	18%
Índice de Plasticidad (IP)	12,30%

Tabla 2.2. Límites de Atterberg

Finalmente, se escogió la última dosificación denominada dosificación C, formada por una relación 9/2 en peso como la más apropiada para la construcción de la obra por recomendaciones procedentes de personas expertas en la materia. Es cierto, tal y como se puede apreciar en la figura 2.7, que parte de la curva referida a la muestra elegida no se encuentra en el rango propuesto, sin embargo, los resultados obtenidos se analizaron y referenciaron una vez ya comenzada la campaña de preparación de la tierra para la fabricación de las probetas. Según los autores, los valores son simples aproximaciones y que dependen de la calidad de los distintos componentes entre otros factores. Es por ello, que una dosificación que no se encuentre entre dichos valores puede ofrecer buenos resultados para el objetivo que se persigue. Al incorporar esta *arena gravosa* se consiguió mejorar el grado de compactación además de la densidad seca del material y su resistencia.

A pesar de realizar una criba a priori de la tierra para eliminar cualquier partícula superior a 20 mm en nuestra mezcla, ya que se aconseja que no supere este tamaño de árido, para el caso que nos ocupa, es decir, realizar probetas para su posterior ensayo, resultó conveniente realizar una nueva selección. Para ello se cribó la mezcla final por un tamiz de 12 mm obteniendo la siguiente curva granulométrica final:

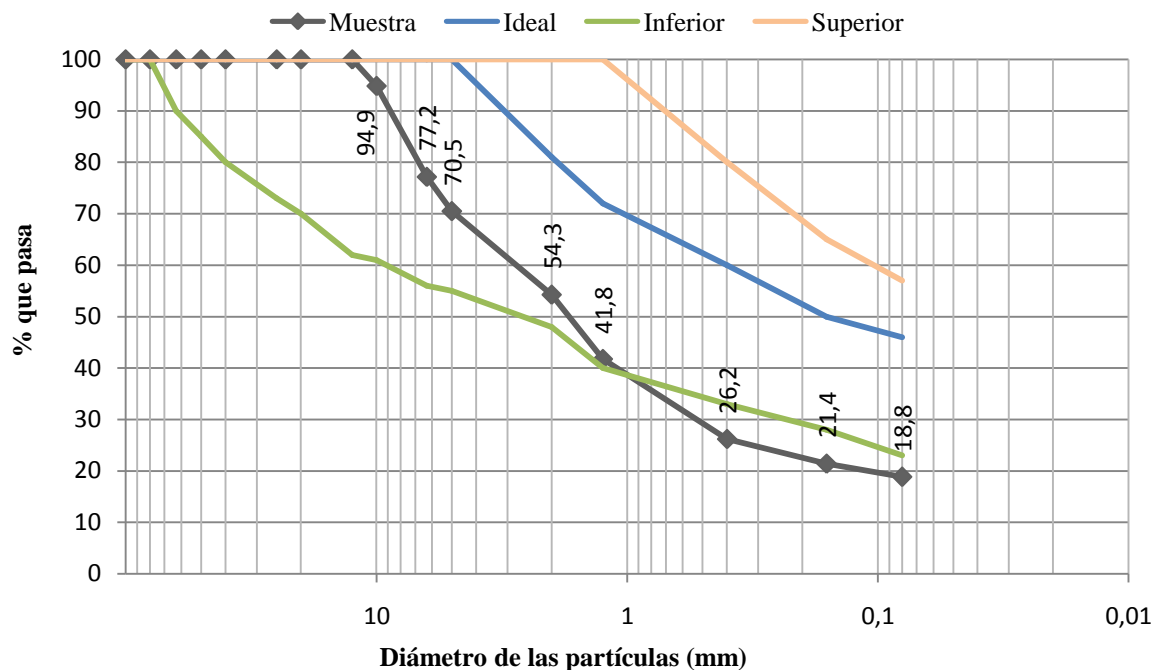


Figura 2.8. Granulometría de la mezcla final

Finalmente las cantidades de los distintos componentes fueron:

- **% Grava:** 45,73%
- **% Arena:** 35,44%
- **% Finos:** 18,83%

2.2 Ensayos Próctor Normal

La ejecución de este ensayo a las tres dosificaciones seleccionadas y comentadas en el punto anterior se respaldó por la norma **UNE 103-105-94: Ensayo de Compactación. Próctor Normal**. La finalidad de dicho ensayo consiste en obtener la humedad óptima relacionada con una densidad máxima seca o máximo grado de compactación. Dicho valor coincide con el punto de inflexión en la gráfica resultante para una energía de compactación dada. Así mismo, este ensayo ofrece una referencia base para la compactación de la tapia obteniendo la humedad a la que sería conveniente que se ejecutara la mezcla para garantizar unos buenos resultados.

Se realizaron tres ensayos, uno para cada dosificación además de un ensayo extra a aquella que fue la seleccionada para la fabricación y ensayo de las probetas, la dosificación C. El procedimiento a seguir se encuentra normalizado y consiste, a grandes rasgos, en rellenar un molde cilíndrico (previamente pesado vacío) de aproximadamente 1000 cm³ en tres capas equivalentes del material. Cada punto de la gráfica se obtiene agregando poco a poco cantidades de agua y mezclando correctamente de forma manual para garantizar la hidratación del conjunto. Se comenzó añadiendo un 5%, seguido de un 2%, un 1% y por último otro 1% de humedad en peso alcanzando el 9% programado. Cada una de las capas es compactada con un pisón normalizado de 2,5 kg suministrando un total de 26 golpes en cada tongada. Esta maza metálica se encuentra adaptada en su interior de una guía tubular adecuada para que la altura de caída libre sea aproximadamente 305 mm.

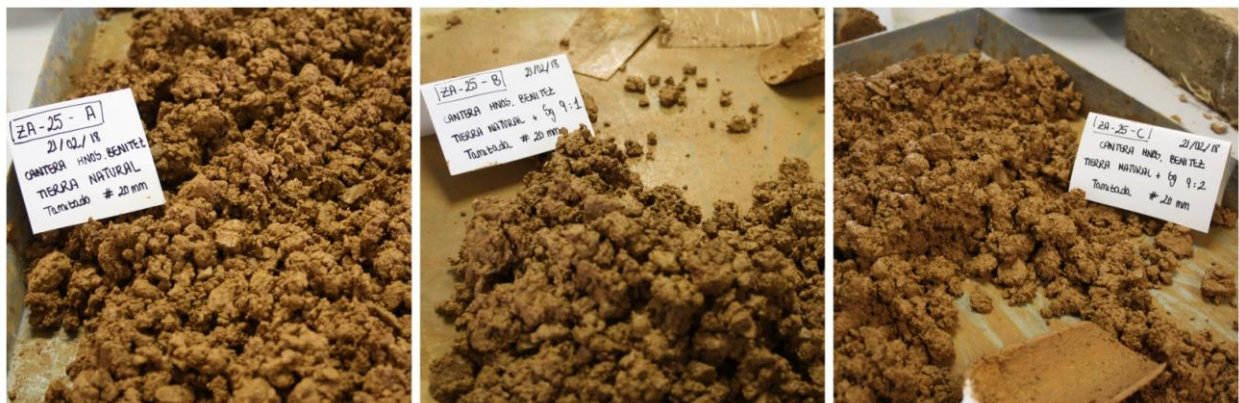


Figura 2.9. Dosificaciones A,B y C con 8% de humedad

Todo ello se llevará a cabo aportando una energía de compactación al material calculada con la siguiente fórmula:

$$\frac{E_c}{V} = n_c * (m_p * g * h_c) = 583,44975 \frac{J}{m^3}$$

Siendo m_p el peso del pisón en kg, g el valor de la gravedad en m/s², h_c la altura de caída de la maza en m, n_c el número de golpes del ensayo Próctor Normal y V el volumen de la muestra.

Al terminar el procedimiento descrito en cada porcentaje de humedad, se pesa el molde junto con la masa que queda en el interior y se desmolda para obtener una muestra de aproximadamente 100 gramos del interior del material ensayado.



Figura 2.10. Molde con tierra compactada para ensayo Próctor Normal



Figura 2.11. Muestras seleccionadas colocadas en una urna aislada

Con esta muestra y el procedimiento descrito en la norma **UNE 103-300-93: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa** [16], obtendremos la humedad real con la que se trabajó. Para ello secamos la muestra en el horno hasta conseguir masa constante a una temperatura entre 105 y 115 °C, colocándolas posteriormente en una urna aislada durante unos minutos para que vuelva a temperatura ambiente sin ganar humedad.

La humedad resultante se obtiene aplicando:

$$W(\%) = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_1} * 100$$

Siendo:

- M_1 : peso del recipiente limpio y vacío
- M_2 : peso recipiente con muestra húmeda
- M_3 : peso recipiente con muestra seca

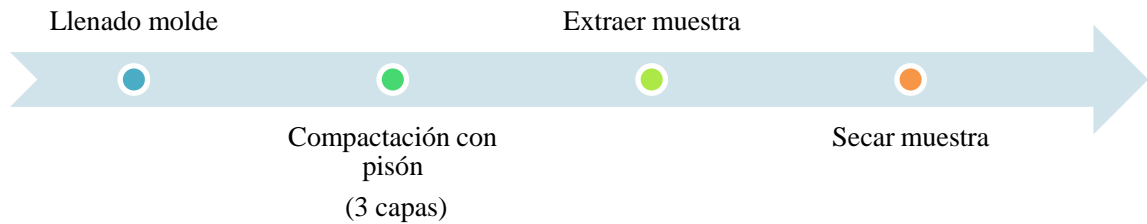


Figura 2.12. Esquema procedimiento ensayo Próctor Normal

Debido al desconocimiento de cómo reaccionaría nuestra tierra, el comenzar añadiendo un 5% de agua a la muestra fue un error, ya que la humedad óptima buscada resultó ser un valor muy próximo a este 5% añadido. Esto produjo que los resultados obtenidos no fuesen prácticamente válidos.

Posteriormente, para corregir dicho error, se realizó un nuevo ensayo Próctor a la dosificación elegida para la fabricación de las probetas, es decir, la muestra C, comenzando esta vez por añadir un 3% de humedad a la muestra seca.

Cabe destacar que durante la realización de los ensayos pueden surgir situaciones que provoquen errores en los resultados como el hecho de que la muestra no se encuentre totalmente seca en su origen, por lo que se parte de una humedad que no está controlada. Además para la ejecución del ensayo se suelen evaluar 4 niveles de humedad distintos, sin embargo, si se efectuaran más puntos se obtendría una solución más aproximada a la real.

El resultado del ensayo Próctor Normal de la dosificación elegida fue el siguiente:

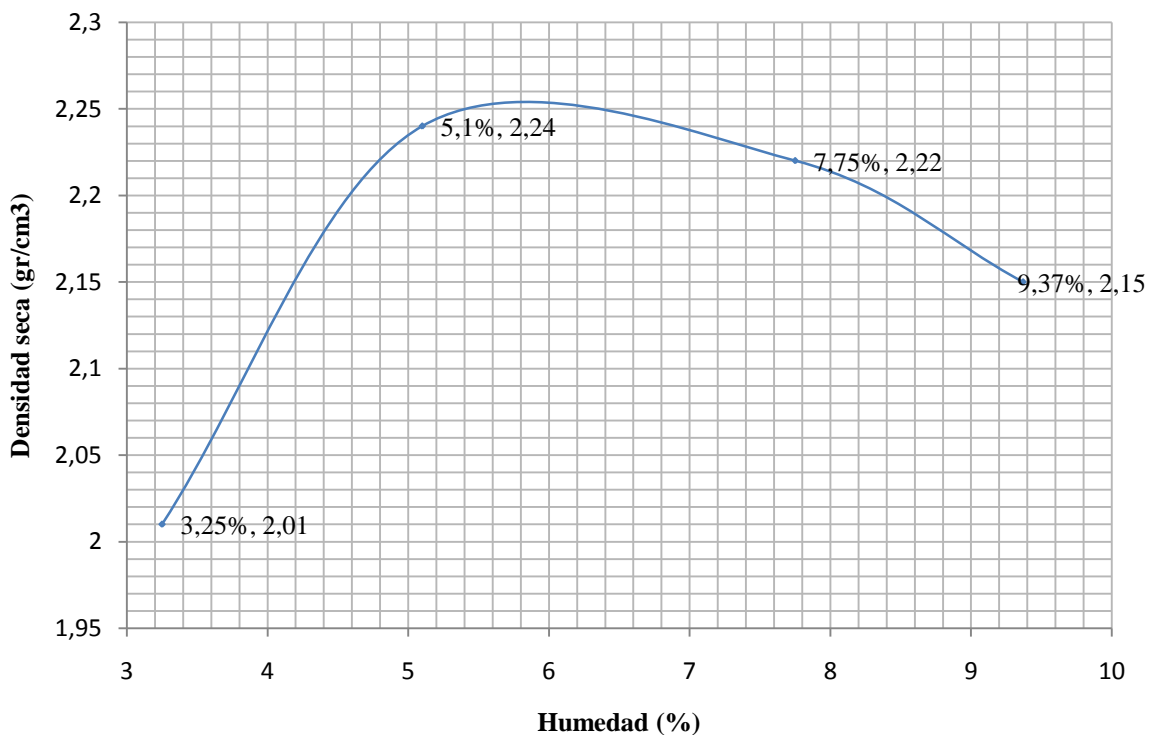


Figura 2.13. Resultado ensayo Próctor Normal

Donde la máxima densidad seca corresponde a $2,25 \text{ gr/cm}^3$ asociada a un contenido en humedad óptimo de 5,6%.

3 PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

Se llevó a cabo un proceso definido y ordenado para la fabricación de las probetas con la finalidad de ejecutar distintos ensayos: *compresión simple*, *ensayo a tracción indirecta* y *flexión en tres puntos*. Se decidió fabricar tres tipos distintos de probetas, un grupo formado por veinte probetas prismáticas, otro formado por once probetas cilíndricas y por último ocho probetas prismáticas pero de una mayor longitud que las primeras destinadas a los ensayos de flexión en tres puntos. Tras obtener los distintos moldes con las dimensiones específicas de cada tipo de probeta, se procedió a la confección de estas llevando a cabo simultáneamente el control de algunos parámetros como el porcentaje de humedad o la energía de compactación ejercida. El procedimiento se desarrollará en los siguientes puntos.

3.1 Fabricación de los moldes

Gracias a la continua ayuda de uno de los miembros de la ya nombrada asociación TAPH TAPH se obtuvieron unos moldes para la fabricación de los dos tipos de probetas prismáticas. Los moldes consistieron en un conjunto de tablas fabricadas con maderas de encofrar que ensambladas formaban la cavidad con las dimensiones específicas para introducir la cantidad de tierra necesaria y fabricar así las probetas. Se aportaron dos moldes para las probetas prismáticas y uno para aquellas asignadas a los ensayos de flexión en tres puntos además de unas bases del mismo material para asegurar una mayor comodidad a la hora de transportar las probetas ya fabricadas y colocarlas en la zona de curado.



Figura 3.1. Componentes del molde para probeta prismática sin refuerzos

Como la energía de compactación necesaria era elevada, para aportar una mayor rigidez a los moldes, ya que tras varias pruebas se originó una grieta en uno de ellos, se les añadieron unos refuerzos. Se adaptaron unas varillas roscadas que unían las paredes de los moldes además de unos bloques de maderas encolados para evitar la aparición de nuevas grietas o su propagación.



Figura 3.2. Evolución refuerzos para molde de probetas prismáticas

En el momento de la fabricación de las probetas se le añadió, además, unas escuadras de forma perpendicular al resto de rigidizadores para evitar en la medida de lo posible que con la presión ejercida por la tierra compactándose en el interior, el molde se flexionase provocando una deformación no deseada en la probeta.

Para la fabricación de las probetas cilíndricas se utilizaron moldes metálicos ya existentes en el laboratorio que garantizaban un buen funcionamiento. El utilizar este tipo de moldes fue beneficioso ya que agilizó el proceso de fabricación de dichas probetas.

3.2 Tipos de probetas. Geometría.

Se implementó un proceso de fabricación de tres tipos de probetas con distinta geometría. Este proceso se inició el día 10/05/2018 y finalizó el día 29/05/2018 con las probetas destinadas a flexión en tres puntos.

Las primeras en ser fabricadas fueron las **probetas prismáticas**, con un volumen aproximado de 2 litros y con unas dimensiones ideales de 100*100*200 mm, destinadas tanto a la ejecución de ensayos a compresión simple como a ensayos a tracción indirecta o ensayo brasileño. Dichas probetas fueron fabricadas gracias a los moldes previamente descritos. En cualquier caso, para la elaboración de todos los tipos de probetas existentes, el objetivo era aproximarse a la densidad seca óptima obtenida gracias al ensayo Próctor Normal llevado a cabo en la ETSA. Para ello se introdujo en el molde una cantidad específica de material y se continuó siguiendo un proceso de compactación estática con la ayuda de un actuador hidráulico. Se empleó un total de 5 días, donde se incluye también la confección de diez probetas extra utilizadas para optimizar el control de compactación aplicado en el momento de la fabricación y para ejecutar pruebas de los distintos ensayos.

Para seguir un orden y una nomenclatura concreta durante todo el proceso, estas probetas se nombraron comenzando con la letra 'P' seguida de un número del 1 al 20, siendo P1 la primera probeta fabricada y P20 la última. Las probetas de prueba se denominarán 'PP' seguido de una numeración idéntica a la anterior.

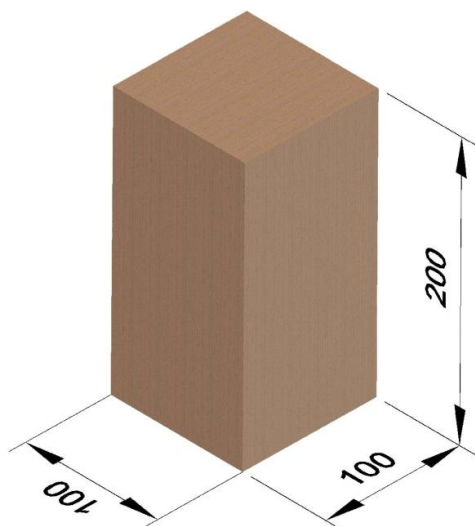


Figura 3.3. Dimensiones probetas prismáticas en mm

Para continuar, se fabricaron las **probetas cilíndricas**. Estas se elaboraron con unas dimensiones aproximadas de $113 \times \phi 100$ mm, utilizando un molde normalizado de acero que facilitó el proceso de fabricación ya que eliminaba todos aquellos defectos de molde que sí aparecieron en los de madera, como la formación de grietas o el deterioro de las paredes que afectaba a las caras de las probetas prismáticas generando un acabado superficial más áspero y rudo. Como consecuencia, el tiempo de fabricación fue muy reducido, logrando el objetivo de fabricar todas las probetas cilíndricas necesarias en dos días, un total de once probetas más tres de prueba entre los días 17/05/2018 y 18/05/2018.

En este caso la nomenclatura se asemeja a la anterior, comenzando por C1 y acabando en C11. Las probetas de prueba se denominaron CP1, CP2 y CP3.

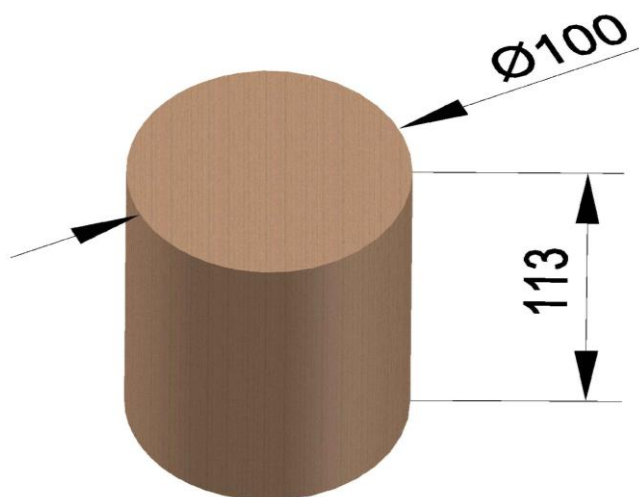


Figura 3.4. Dimensiones probetas cilíndricas en mm

Por último, las **probetas prismáticas destinadas a los ensayos de flexión** se fabricaron en un molde similar al primero pero con las dimensiones ajustadas a las que generalmente se utilizan para ejecutar dicho ensayo. En concreto, las dimensiones eran de $450 \times 100 \times 100$ mm ofreciendo, por tanto, un volumen de 4,5 litros. Para la fabricación de dichas probetas se utilizó el pórtico de carga disponible en el laboratorio con una célula de carga de capacidad de veinte toneladas, ya que la fuerza necesaria para la fabricación de este tipo de probetas era más elevada que la máxima permitida en la máquina universal de ensayos con la que se fabricaron las probetas anteriores.

Para finalizar con la nomenclatura, estas probetas fueron nombradas con la letra 'F' y una numeración siguiendo los criterios anteriores, del 1 al 8.

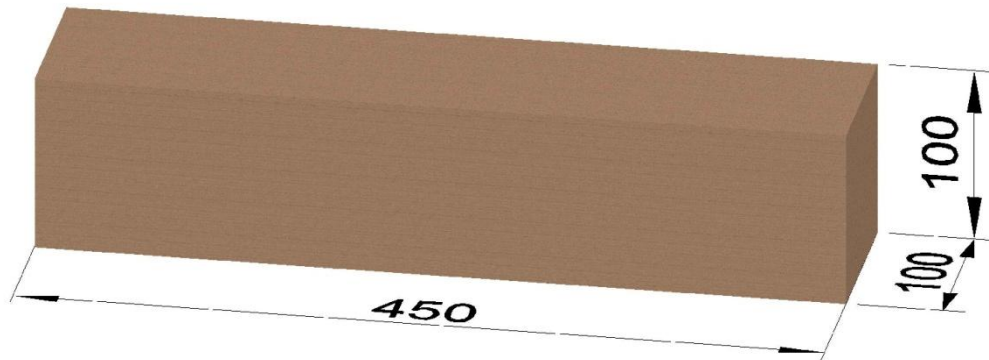


Figura 3.5. Dimensiones probetas prismáticas para ensayo a flexión en tres puntos en mm

Grosso modo, todas las probetas descritas anteriormente se ejecutaron con una densidad lo más cercana posible a la obtenida por el ensayo Próctor Normal, es decir, 2,25 kg/l, además, la tierra con la que se partía para la fabricación poseía una humedad calculada y añadida para ser próxima a la óptima ofrecida por dicho ensayo.

3.3 Procedimiento de fabricación de las probetas

Para acometer el proceso de fabricación de las distintas probetas se activó un protocolo ordenado para evitar el máximo número de errores y lograr un procedimiento semejante en las tres geometrías de probetas. Dicho procedimiento será descrito a continuación por pasos, y gracias a éste se consiguieron obtener parámetros como un control de humedad de cada probeta o la energía de compactación con la que fueron fabricadas y así cumplir los objetivos que se marcaron antes de comenzar. Este proceso tuvo una duración aproximada de dos meses incluyendo el curado de las probetas.



3.3.1 Paso 1. Preparación de la tierra. Mezclado de los componentes.

El objetivo fundamental de este paso consiste en elaborar la mezcla para la posterior fabricación de todas las probetas. Dicha mezcla coincide, como se decidió en función de los resultados del ensayo Próctor Normal y análisis granulométrico posterior de las tres muestras, con la última dosificación estudiada, formada por una relación 9:2 de tierra y arena. En nuestro laboratorio se disponían de varias toneladas tanto de tierra como de arena lo que permitió realizar grandes proporciones de mezcla sin problemas separando en recipientes 45 kg de tierra y 10 kg de arena para introducirlo posteriormente en una hormigonera.

La arena, del mismo modo que se realizó en el laboratorio de la ETSA, se cribó por un tamiz de 2 mm algo más robusto y de mayor dimensión que los tamices normalizados de laboratorio pero que facilitaría y agilizaría el proceso de tamizado. Para corroborar que el tamiz de obra era fiable se realizó una prueba anterior cribando 2,49 kg de tierra tanto por un tamiz de laboratorio como por el de obra obteniendo una diferencia de un 5%, siendo éste un error admitido si se precisan de cantidades elevadas como era nuestro caso. Esos 10 kg de arena necesarios para la mezcla fueron tomados de la cantidad que pasaba por dicho tamiz.



Figura 3.6. Proceso de tamizado de la arena



Figura 3.7. Aspecto de la arena tras el proceso de tamizado

Una hormigonera de un tamaño medio nos aportó una ayuda extra para conseguir un mezclado deseable de ambos materiales puesto que a mano dicho proceso se hubiese convertido en un transcurso mucho más costoso y lento. A ojo, se decidió que la máquina estuviese activa durante 4 minutos aproximadamente consiguiendo una tierra totalmente uniforme donde la mezcla formada por grava, arena y arcilla era un conjunto, evitando cualquier aglomeración por separado de uno de estos materiales.

Esta metodología se puso en funcionamiento un total de 14 veces obteniendo alrededor de 330 kg de mezcla. Dicha mezcla se extendió sobre una lona colocándola de forma que se mantuviese formando una capa lo más fina posible de nuestro material y así evitar que existan zonas donde se acumule humedad, estabilizándose lo más uniformemente posible.



Figura 3.8. Mezcla final extendida sobre lona

Como se puede apreciar en la figura 3.8, la existencia de árido de un tamaño grueso es clara. Dicho árido, teniendo en cuenta que el objetivo de esta tierra mezclada era la fabricación de nuestras probetas, se acordó como excesivo. Este acuerdo se basó en una prueba de fabricación realizada obteniendo un acabado superficial de la probeta bastante deficiente donde incluso provocaba, si dicho árido se acumulaba en las caras, que se desmoronase la zona disminuyendo en gran medida la fiabilidad de los resultados que se obtendrían posteriormente en los ensayos. Además dicha grava dañaba en gran medida las paredes de los moldes de madera provocando un desgaste que disminuiría la capacidad de producción de estos. Por ello, se decidió tamizar de nuevo la mezcla por un tamiz de obra de 12 mm rechazando lo que retenía consiguiendo así la granulometría de la mezcla final descrita en el punto 2.1.2 y mostrada en la figura 2.8.

3.3.2 Paso 2. Medición humedad previa y añadido de agua a la mezcla

Aunque la mezcla se colocó con el mayor cuidado posible sobre una lona para intentar que no se acumulara humedad entre los huecos de esta tierra y se secase por completo, fue necesaria una medición de humedad de base sobre la que se partiría para el añadido de agua posterior.

Para la obtención de los resultados se tantearon dos procedimientos: mediante un procedimiento tradicional con secado en horno y mediante un secado rápido utilizando una sartén.

Para ambos procedimientos fue necesario apartar entre 1 y 2 kg de la mezcla que se encontraba en la lona. La cantidad escogida no fue premeditada ni fija, sin embargo, debía ser lo suficiente para que los resultados fuesen fiables buscando, en la medida de lo posible, emplear grandes porciones con la garantía de ofrecer mejores resultados.

1. El procedimiento mediante secado en horno fue el usado para cualquier medición de humedad posterior que fuese necesaria. Se colocaba en una bandeja una porción de tierra previamente pesada (M_{hum}) y se mantenía en el horno durante 24 horas a una temperatura de 110° aproximadamente siguiendo así la norma **UNE 103-300-93: Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa**. Tras pasar ese tiempo, se extraía dicha bandeja del horno y se volvía a pesar (M_{seca}), dejando previamente enfriar dicha tierra a temperatura ambiente. En ambos casos el peso de la bandeja se tenía en consideración (M_b).

Para obtener el porcentaje de humedad existente se utilizaba la siguiente fórmula:

$$W(\%) = \frac{M_{hum} - M_{seca}}{M_{seca} - M_b} * 100 \quad (1)$$

Esta medición de humedad previa se realizó en varias ocasiones a lo largo de los días para realizar un control de humedad anterior al añadido de agua necesaria. En todas las ocasiones el porcentaje de humedad existente rondaba un 1,03%.

2. Para apresurar el procedimiento anterior, ya que abarcaba un mínimo de 24 horas, se realizaron mediciones de humedad a través de un secado de la mezcla con la ayuda de una sartén y un hornillo. Para ello, la porción de tierra escogida se introducía en una sartén y se mantenía en el hornillo durante aproximadamente 15 minutos. Además, para conseguir los resultados en menos tiempo, se utilizó alcohol para quemar.

De nuevo, se pesaba la tierra junto con la sartén antes y después de calentarla usando, del mismo modo, la fórmula (1) para obtener el resultado final.



Figura 3.9. Procedimiento de medición de humedad con sartén.

Aunque los resultados obtenidos en ambos procedimientos fuesen similares, este último dejó de repetirse ya que no se podía considerar del todo fiable. En general la tierra se calentaba en exceso, no sintiendo la confianza de si lo que realmente estaba perdiendo la mezcla era agua. Al remover la tierra mientras se calentaba desprendía polvo que podría pertenecer a la arcilla de la mezcla. Como se trabajaban con pequeñas cantidades, cualquier pequeña variación provocaba una notable disminución en los pesos controlados.

Para concluir este paso, la mezcla final se iba agrupando en cubos con 20-25 kg de tierra mezclada a los que se les añadía el agua necesaria dependiendo de la masa de tierra incluida en cada cubo para la búsqueda de la húmeda óptima ofrecida por el ensayo Próctor Normal. Para agilizar de nuevo la mezcla agua/tierra se utilizó la hormigonera. Esta mezcla se realizó en el interior del laboratorio para evitar que se produjese cualquier posible sobrecalentamiento que alterase los porcentajes de humedad establecidos. Se añadieron poco a poco proporciones de mezcla y agua combinados intentando que no se derramase hacia las paredes de la máquina ya que de esta forma se podrían crear terrones de mezcla más húmeda de lo pretendido en las paredes quedando irregularidades en cuanto a cantidad de agua.

Gracias a los resultados obtenidos, el añadido de agua se pudo realizar directamente teniendo en cuenta que la tierra con la que se estaba trabajando poseía un 1,03% de humedad. La humedad óptima de Próctor y por ello, humedad a la que se trabajó, era 5,6% . Se consideró añadir, por tanto, un 4,6% en peso de agua a todos los cubos. Estos fueron nombrados para así implementar un control de humedad que será comentado en el siguiente paso.

3.3.3 Paso 3. Control de humedad. Medición con horno y mediante medidor de humedad

Justo antes del proceso de fabricación se apartó una porción de tierra para así llevar un control de la humedad existente de cada una de las probetas. El proceso de cálculo de humedad coincide con el procedimiento mediante secado en horno descrito en el punto 3.3.2. La siguiente tabla presenta la humedad de cada cubo y con qué cubo se fabricó cada probeta para así analizar la influencia de la humedad a la hora de fabricar la probeta y su comportamiento a posteriori. El cubo número 5 no fue anotado.

Probeta	Cubo	Humedad	Probeta	Cubo	Humedad
PP1	1	6,309%	P6	3	5,3128%
PP2			P7		
PP3			P8		
PP4			P9		
PP5			P10		
PP6	2	5,182%	P11	4	5,1936%
PP7			P12		
PP8			P13		
PP9			P14		
P1	5		P15	6	4,9144%
P2			P16		
P3			P17		
P4			P18		
P5			P19		
			P20		
Probeta	Cubo	Humedad	Probeta	Cubo	Humedad
CP1	7	4,876%	PF1	8	5,4119%
CP2			PF2		
C1			PF3		
C2			PF4	9	5,409%
C3			PF5		
C4			F1	10	5,218%
C5			F2		
C6			F3	11	5,1986%
C7			F4		
C8			F5	12	5,316%
C9			F6		
C10	8	5,4119%	F7	13	4,939%
C11			F8		

Tabla 3.1. Probetas y porcentajes de humedad obtenidos mediante secado en horno

Además del procedimiento tradicional con la ayuda del horno se utilizó un aparato de medida de humedad denominado **FieldScout TDR-150**. Este aparato portátil es capaz, a partir de la introducción de unas varillas o sondas en el suelo existente, de obtener parámetros como la humedad volumétrica (VWC %), la conductividad eléctrica (Ec) o la temperatura del suelo entre otros. Para ello es necesario indicar el tipo de suelo con el que se está trabajando (Standard, High Clay o Sand), ya que reconoce la cantidad de aire existente en los huecos que depende del tipo de suelo y provoca una variación en el porcentaje VWC o humedad volumétrica. Asimismo es necesario indicar el tipo de varillas colocadas (Short 3" o Long 7.9"). En nuestro caso se decidió elegir el tipo de suelo estándar y las varillas cortas ya que se adaptaban mejor al recipiente donde se realizaban las mediciones.

Este aparato permite obtener la humedad en dos unidades de medida distintos: VWC, o contenido de agua volumétrico expresado en % o TDR (Time Domain Reflectometry) relacionado con el tiempo(μ s) que tarda en viajar una onda electromagnética a lo largo de una guía de onda en forma de varillas de acero inoxidable reemplazables. La velocidad de onda en la tierra depende de la permitividad dieléctrica del suelo. La información de la señal emitida es capaz de convertirla en contenido de agua volumétrico.



Figura 3.10. Medidor de humedad FieldScout TDR-150

Es un medidor preciso y de fácil manejo muy usado en el área agrícola. Si se puede afirmar que trabaja de igual manera a pequeña escala, resultaría muy práctico y agilizaría la medición de humedades, obteniéndolas con un click y evitando esperar las veinticuatro horas necesarias para que un suelo se seque por completo en el horno.

Se procedió a calibrar dicho aparato tomando medidas de humedad tanto en formato VWC como TDR. Para realizar la calibración se apartó una porción de tierra de mezcla final en un cubo y se comenzó a añadir agua de 1% en 1% tomando mediciones con el aparato antes de cada adición hasta llegar a 11% en peso de agua añadida. Este ciclo se repitió tres veces obteniendo tres curvas. Durante el proceso se llegó a la conclusión que las medidas obtenidas mediante TDR eran más precisas que con VWC, por este motivo, se tuvieron en cuenta solamente las medidas asociadas a TDR tanto en la calibración como en las mediciones posteriores.

Esta calibración se encuentra detallada en el Trabajo Fin de Grado de Jose Luíís Bocanegra Cerrada: *Puesta a punto de técnica de fabricación de probetas de tapia* (2018). A partir de esta se obtuvo la correspondencia en porcentaje de humedad en peso de los valores registrados en el momento previo de la fabricación. Así se obtuvo un control de humedad de las probetas.

Probeta	Humedad	Probeta	Humedad	Probeta	Humedad	Probeta	Humedad
PP1	2,01%	P6	0,95%	CP1		PF1	4,67%
PP2	1,09%	P7	2,43%	CP2	4,060%	PF2	4,67%
PP3	1,12%	P8	3,42%	C1	4,250%	PF3	4,67%
PP4	2,15%	P9	3,29%	C2	3,874%	PF4	3,19%
PP5	2,03%	P10	3,42%	C3	3,995%	PF5	3,19%
PP6	1,77%	P11	2,58%	C4	2,806%	F1	3,07%
PP7	1,52%	P12	3,07%	C5	3,423%	F2	1,50%
PP8	0,46%	P13	2,66%	C6	3,139%	F3	3,36%
PP9	1,08%	P14	2,96%	C7	3,322%	F4	2,95%
P1	0,66%	P15	2,31%	C8	2,257%	F5	3,10%
P2	0,35%	P16	3,28%	C9	2,257%	F6	3,24%
P3	0,50%	P17	3,35%	C10	3,571%	F7	3,87%
P4	0,53%	P18	3,34%	C11	3,647%	F8	3,87%
P5	1,04%	P19	3,28%				
		P20	3,12%				

Tabla 3.2. Probetas y porcentajes de humedad obtenidos por calibración de FieldScout TDR-150

Los resultados con bajos porcentajes asociados a las primeras probetas prismáticas, es decir, desde PP1 hasta P6, se encuentran vinculados al método de obtención de medidas. En primer lugar, se decidió tomar dichas mediciones introduciendo el aparato en el interior del molde una vez relleno previamente a la compactación. Este hecho se repitió durante las primeras probetas fabricadas. Tras varias operaciones, nos pareció más apropiado tomar las medidas en el cubo de donde se sustraía la tierra para colocarla en el molde. De este modo, coincidía la metodología de toma de medidas tanto en la calibración como en el control de humedad posterior.

A pesar de ello, los resultados de humedades recogidos en la tabla 3.2., son en su totalidad más bajos que los calculados con el método tradicional. Como consecuencia, resultaría conveniente realizar una toma de medidas más extensa para calibrar el sensor ya que la calibración no ofrece valores por debajo de 2060 μs , considerando el inicio de la curva poco fiable.

Para terminar este apartado, cabe recalcar que resulta más conveniente hablar de aproximaciones ya que el hecho de controlar la humedad de forma precisa resulta casi imposible. Por esa razón, durante la construcción se controla al tacto o de forma visual. Además en obra, se realiza el añadido de humedad en volumen por el simple hecho de la falta de instrumental necesaria para conseguir dosificaciones en peso. En nuestro caso se controló la humedad en peso para tener una mayor exactitud a la hora de ajustar las cantidades de agua.

3.3.4 Paso 4. Fabricación de las probetas

Una vez efectuado todo lo anterior se procedió a la fabricación de todas las probetas en los moldes previamente fabricados. Este proceso se realizó en la máquina universal de ensayos de la marca Servosis en el caso de las probetas prismáticas y cilíndricas mientras que para las probetas prismáticas de mayor longitud se necesitó el pórtico de carga. El procedimiento de fabricación se considera una compactación estática con el actuador hidráulico de cada máquina. Para ello, el cilindro superior se va desplazando con la ayuda de un pisón que se colocó sobre la tierra del interior del molde. De esta manera se consigue que la carga se reparta lo más uniformemente posible sobre la probeta. El pisón, para el caso de las probetas prismáticas, fue fabricado a partir de una viga IPE cuyas dimensiones coincidían con la base de las probetas, adaptándose mejor y comprimiendo por igual en cada esquina.

Si bien es cierto que la construcción con tapia se caracteriza por realizarse a partir de varias tongadas de tierra e ir compactando cada capa de forma manual con un pisón empleando una energía específica que dependerá de la altura y peso del pisón además del número de golpes aplicados. El hecho de ir compactando a base de golpes mejora la colocación de los áridos, rellenando los huecos, además de poder garantizar que todas las capas estarán igual de compactadas. Se estudió la posibilidad de realizar las probetas de forma manual, sin embargo, la necesidad de fabricar probetas prismáticas de 4.5 L disparaba los valores como el peso del pisón o el número de golpes. Algunos autores como Bauluz y Bárcena[6] consideran añadir una fuerza adicional de golpeo y no la caída libre del pisón lo que disminuiría el resto de parámetros por el aumento de energía de compactación, aún así, es indiscutible que este procedimiento manual está relacionado con el control de un conjunto de parámetros que convertiría la fabricación de las distintas probetas en un proceso muy costoso y lento. Es por ello que se decidiera llevar a cabo un proceso de compactación continua y estática con la ayuda de una máquina de ensayos, ejerciendo presión sobre una única tongada de mezcla.

El modo de proceder era el mismo para todos los tipos de probeta. Partiendo de una mezcla con la humedad añadida que fue decidida con antelación, se procedía a llenar el molde. Previamente, se untaban las paredes interiores con aceite de linaza facilitando así el desmoldeo de la pieza. El conjunto se situaba en la máquina correspondiente colocando uno o varios pisonos dependiendo de la probeta a fabricar sobre la base superior consiguiendo que la irregularidad que provocaba la tierra sin compactar disminuyera y se realizaba una compactación controlada. Una vez terminada la compactación se procedía a desmoldar con cuidado y se trasladaba la probeta a una sala del laboratorio destinada para su curado.

La fabricación de las probetas se ejecutó con un control de parámetros gracias a un ordenador que ofrecía la posibilidad de realizar tanto un control en carga como un control en desplazamientos. En la mayoría de los casos, y sólo como prueba, el caso contrario, se llevó a cabo un control en desplazamientos. Este permite una aplicación de la carga mucho más uniforme y estática mientras que, si se controla en fuerza, esta es siempre constante, sin tener en cuenta la resistencia de la pieza que se encuentra bajo la célula de carga pudiendo provocar picos de desplazamiento del pistón no deseables. Este criterio fue también escogido para los ensayos posteriores.

El software informático asociado a las señales que reciben los distintos canales permite obtener en tiempo real una gráfica fuerza frente al desplazamiento del pistón que será posteriormente analizada para la obtención de la **energía de compactación** con la que se fabricaron cada una de las probetas.

El objetivo fundamental a la hora de fabricar las probetas era la búsqueda de una densidad igual a la obtenida en el ensayo Próctor Normal compactando una única tongada de tierra hasta la altura que provocaba dicha densidad.



Figura 3.11. Fabricación probeta prismática. Compactación y resultado final

En el caso de las **probetas prismáticas** las dimensiones eran fijas y previamente establecidas, de modo que, se iba buscando que el resultado fuese una pieza de una altura de 20 cm. Conocidas las dimensiones, puedo obtener el volumen que ocupa dicha probeta y que está directamente relacionado con la densidad y la masa seca. Cómo la densidad es un objetivo y por tanto es dato, la masa seca es la única incógnita a resolver.

Como se parte de una humedad objetivo también, 5,6% en peso, se puede conocer directamente la masa húmeda o masa que se debe de añadir directamente al molde para obtener la densidad objetivo.

La masa final a añadir con el fin de fabricar las probetas prismáticas era 4,752 kg. En consecuencia a las probetas de prueba que se realizaron, uno de los moldes no fue capaz de soportar la presión interior que ejercía dicha cantidad de tierra por lo que se decidió disminuir la masa a 4,490 kg en base a prueba y error. Logrando, finalmente, que las probetas tuviesen una densidad seca de 2,126 kg/l.

El control de compactación para las probetas prismáticas se llevó a cabo en dos rampas, con una primera rampa a una mayor velocidad hasta algo más de la mitad del recorrido para así agilizar el proceso y una segunda rampa que finalizaba la compactación.

Únicamente, la probeta P17 se fabricó con un control en fuerza, el resto siguió un control en desplazamientos que en la mayoría de los casos fue:

- Rampa 1: 60 mm/min hasta 95 mm
- Rampa 2: 25 mm/min hasta 124 mm

El valor último del desplazamiento del pistón en la última rampa se fue ajustando en función de la probeta resultado recién fabricada, ya que generalmente, no se alcanzaba obtener de forma exacta los 200 mm de altura objetivos.

Para seguir un orden y dándole prioridad a que todos los tipos de probetas acabasen con la misma densidad final se decidió añadir 2 kg de mezcla a los moldes cilíndricos para la posterior fabricación, obteniéndose un volumen de 0,89 L. Gracias a ello se conoció que la altura final de dichas probetas debería ser 113 mm, dato clave y necesario para asignar el control de compactación.

Este control fue de nuevo en desplazamientos:

- Rampa 1: 60 mm/min hasta 35 mm
- Rampa 2: 25 mm/min hasta un valor entre 60 y 70 mm ajustándose del mismo modo que en las probetas prismáticas



Figura 3.12. Fabricación probeta cilíndrica

La máquina universal de ensayos utilizada posee una capacidad de carga de 5 Tn considerándose suficiente para la fabricación de las probetas prismáticas y cilíndricas, sin embargo para la fabricación de las probetas destinadas a flexión en tres puntos fue necesaria la utilización del pórtico de carga.

Del mismo modo y realizando la misma operación anterior, las probetas prismáticas destinadas a flexión necesitaron 10,510 kg de mezcla para cada una. Se utilizaron tres perfiles de acero de distintas dimensiones, colocados sobre esa cantidad de tierra aplanada de forma manual para conseguir que la aplicación de la carga sea lo más uniforme posible.

Al contar con un área de base más extensa, la compactación del material fue más complicada e imperfecta provocando que el resultado visual de las probetas fuese mediocre. Las zonas más afectadas eran los vértices o esquinas dónde el material ya compactado se desmoronaba con el simple hecho de rozarlas. A pesar de ello, para el tipo de ensayo al que se destinaron dichas probetas no se consideró un inconveniente a destacar.

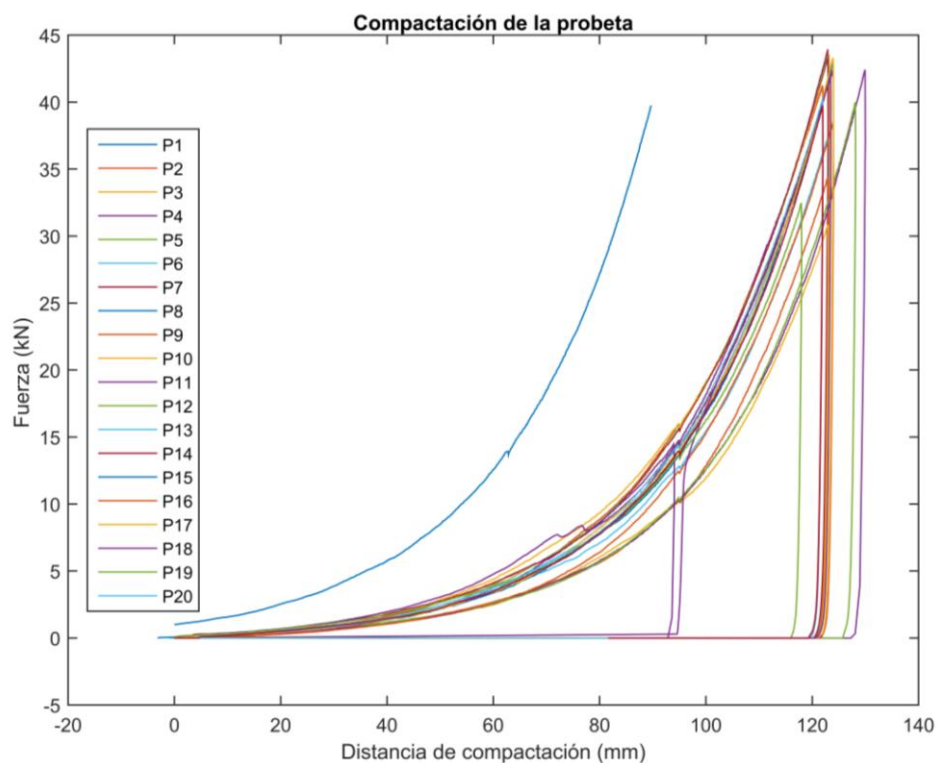


Figura 3.13. Fabricación probeta prismática destinada a ensayo a flexión en tres puntos

El control de compactación asociado a este tipo de probetas fue el siguiente:

- Rampa 1: 30 mm/min hasta -15 mm
- Rampa 2: 15 mm/min hasta 3 mm

Se realizó un control de la **energía de compactación** aplicada a cada probeta. Para ello, gracias a los datos ofrecidos por la máquina donde se fabricaban las probetas como la fuerza y el desplazamiento del pistón, se calcula la energía de compactación. Esta corresponde con el área bajo la curva obtenida. Para optimizar los resultados se ha eliminado el comienzo del ensayo donde la fuerza es prácticamente nula además de la descarga final de la máquina, quedándonos únicamente con la parte ascendente de la curva.



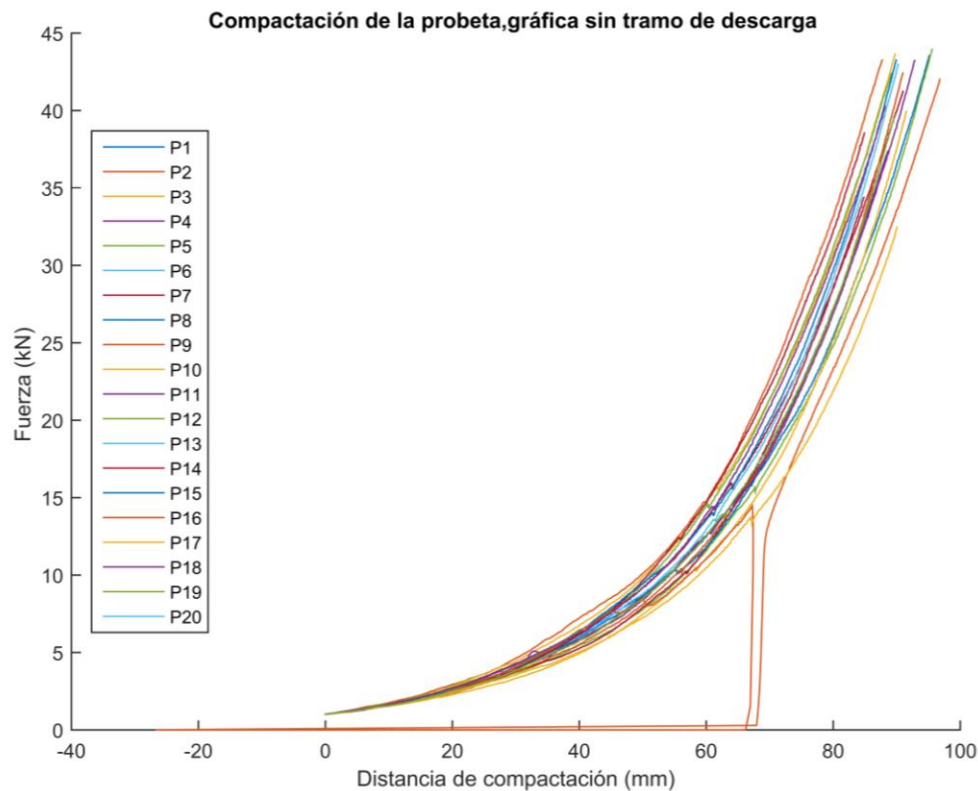


Figura 3.14. Gráfica fuerza frente a distancia de compactación de probetas prismáticas. Con tramo y sin tramo de descarga

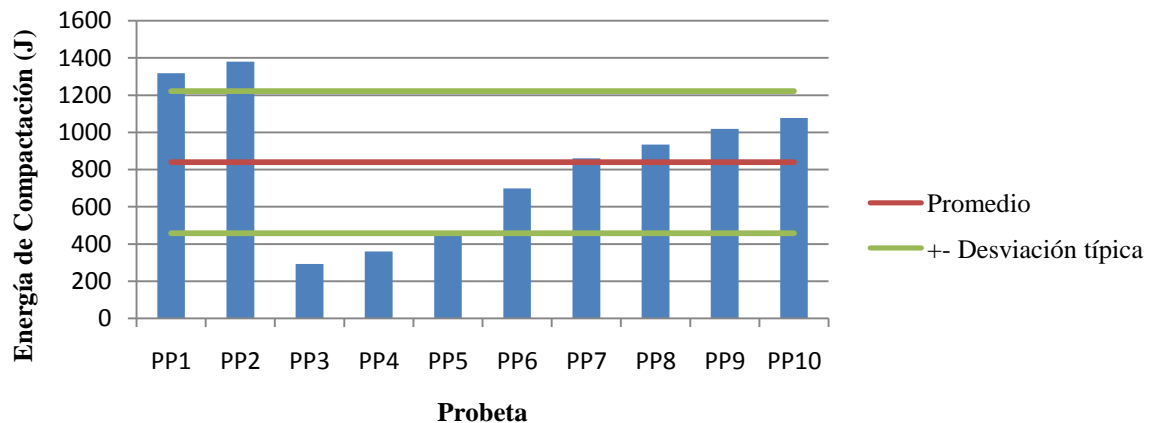


Figura 3.15. Energía de compactación de probetas prueba prismáticas

La fabricación de la probeta P17 fue fallida por el hecho de que el puente de la máquina universal de ensayos que fija el pistón no fue bloqueado, además es la única controlada en fuerzas. Debido a estas situaciones, no se ha considerado la energía de compactación de esta probeta ya que el desplazamiento del pistón medido en las curvas fuerza-desplazamiento no es verdadero, siendo mayor que el real.

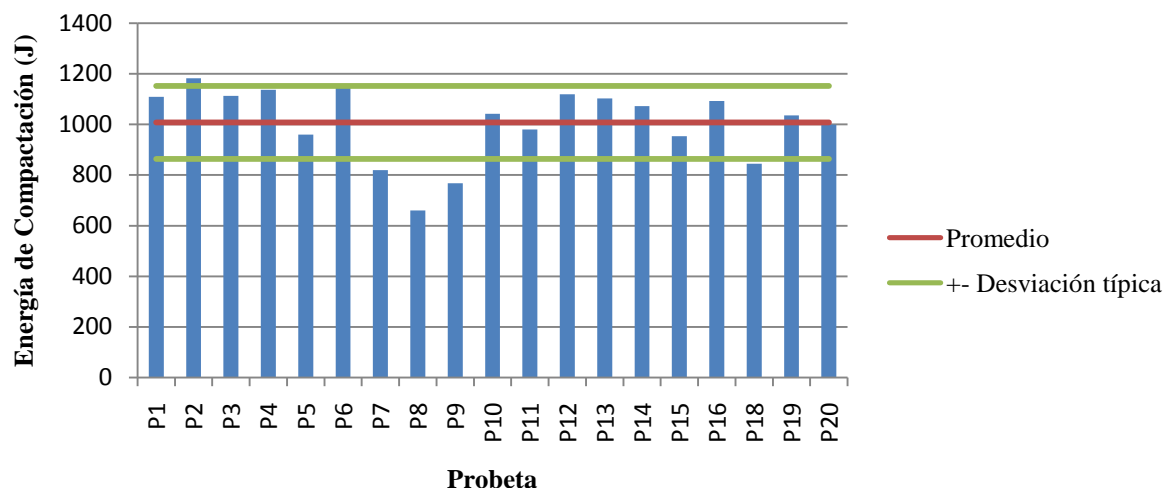


Figura 3.16. Energía de compactación de probetas prismáticas

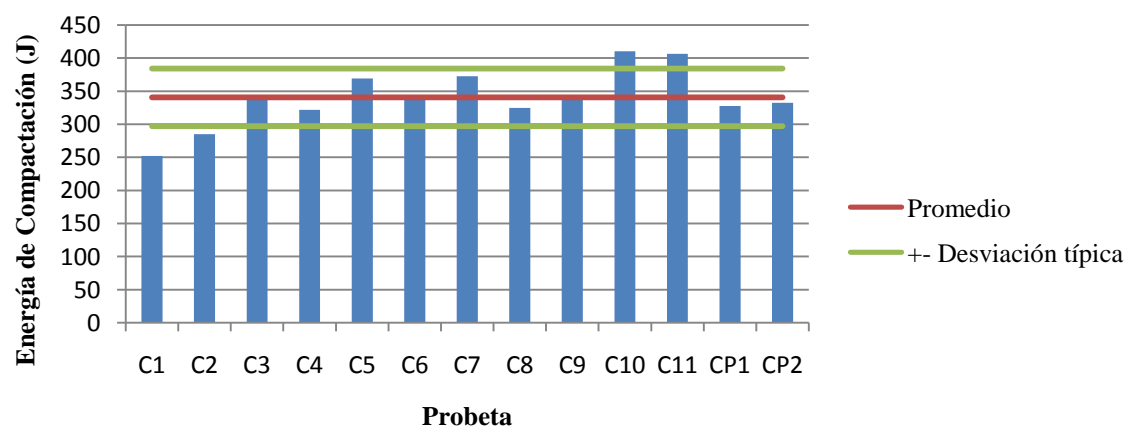


Figura 3.17. Energía de compactación de probetas cilíndricas

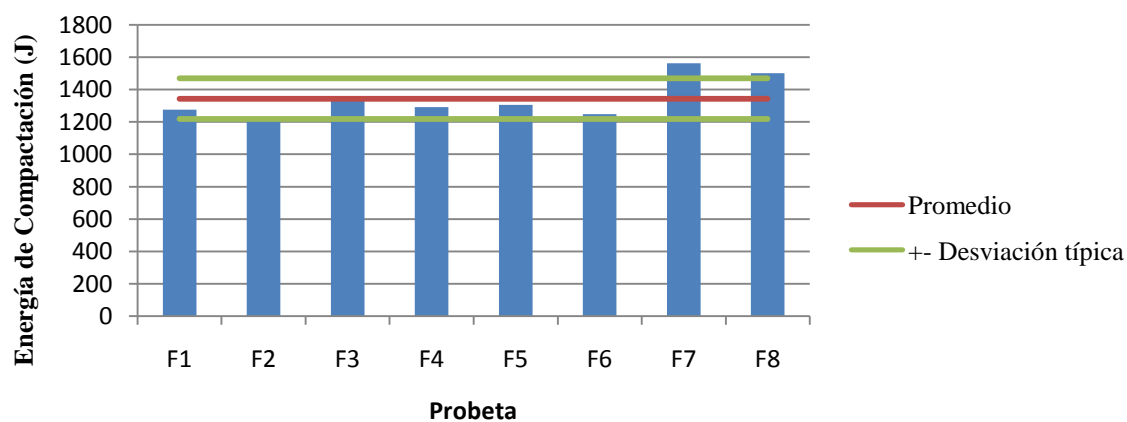


Figura 3.18. Energía de compactación de probetas prismáticas destinadas a ensayo de flexión en tres puntos

3.3.5 Paso 5. Curado de las probetas

Por último, posteriormente a la fabricación de todas las probetas se pasa al curado de las mismas. Estas se conservaron en una sala interior anexa al laboratorio para así cumplir las 4 semanas de curado establecidas. Este periodo es necesario para conseguir que todas las probetas se sequen y junto a ello, que los materiales que conforman la probeta vayan ejerciendo su función. Es así que se consigue el endurecimiento además de la adherencia de las partículas entre sí gracias a la cohesión que genera la arcilla. Es importante evitar la exposición de rayos de sol directas que causen el secado de las capas superficiales más rápido de lo habitual y por tanto pueda generar grietas en la probeta unido a una pérdida de propiedades mecánicas. La velocidad de secado de los elementos dependerá de distintos factores como son el contenido inicial de humedad, el comportamiento de la arcilla para liberar la humedad, el espesor de la probeta y las condiciones climatológicas. Es por ello que se instaló en la sala un controlador de temperatura y humedad.



Figura 3.19. Proceso de curado de probetas prismáticas y cilíndricas



Figura 3.20. Proceso de curado de probetas prismáticas destinadas a flexión en tres puntos

4 ENSAYOS EXPERIMENTALES

Los ensayos consistieron en someter dos geometrías distintas de probetas a compresión simple y, adicionalmente, se realizaron pruebas con ultrasonidos. Se ensayaron tanto probetas cilíndricas como probetas prismáticas que previamente se habían fabricado según el procedimiento descrito en el punto 3 de la presente memoria. Los ensayos de ultrasonidos serán detallados en el punto 4.3.

Centrándonos en los ensayos a compresión simple, para su ejecución, se emplearon dos métodos de medida distintos. Por un lado se utilizaron bandas extensométricas adheridas a las caras de las probetas y por otro lado, y al mismo tiempo, se aplicó un método de medida innovador denominado DIC, que corresponden a las siglas de *Digital Image Correlation*.

Se ensayaron a compresión simple un total de 6 probetas cilíndricas y 8 probetas prismáticas. Todas fueron ensayadas con el método DIC en uno de los lados de ambos tipos de probetas, que denominaremos **cara A**, sin embargo, con respecto a las bandas extensométricas, en las probetas prismáticas fueron adheridas en la cara opuesta a la anterior, llamada **cara B** y en las probetas cilíndricas en ambos lados (cara A y cara B). Cabe recalcar que la probeta C11 no pudo ser medida con la banda extensométrica en la cara A ya que una vez pegada y pintada nos percatamos que se había roto y la probeta CP2 sólo fue medida con la técnica DIC.

Probetas Cilíndricas			
Probeta	EDAD (Días)	Banda(Cara A o B)	DIC
C3	42	A,B	SÍ
C4	42	A,B	SÍ
C5	42	A,B	SÍ
C9	44	A,B	SÍ
C11	44	B	SÍ
CP2	35	NO	SÍ
Probetas Prismáticas			
Probeta	EDAD (Días)	Banda(Cara A o B)	DIC
P5	46	B	SÍ
P8	44	B	SÍ
P10	43	B	SÍ
P11	43	B	SÍ
P12	43	B	SÍ
P15	42	B	SÍ
P17	42	B	SÍ
P19	41	B	SÍ

Tabla 4.1. Probeta ensayada, edad y método de medida utilizado

Para la ejecución de los ensayos se utilizó una máquina de ensayos universal disponible en las instalaciones del laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería cuyo funcionamiento es prácticamente idéntico al de la máquina a partir de la cual se fabricaron las probetas. Esta máquina posee un pistón que aplica la carga en la zona superior de la probeta mientras que la parte inferior, que dispone de un plato donde se apoya comodamente la probeta, se encuentra fija. La toma de medidas por el software informático asociado a dicha máquina comenzará al ser activado, intentando en la medida de lo posible, comenzar el ensayo una vez colocado el cilindro móvil sobre la probeta. Así se evita la medición relacionada con el acoplamiento del pistón.

Del mismo modo que ocurría en el proceso de fabricación, se puede realizar un control en carga o en desplazamientos además de poder indicar la velocidad de aplicación de la carga. El conjunto total de probetas ensayadas fueron controladas en desplazamiento puesto que si se ejecutase un control en fuerza, dichos ensayos resultarían más rápidos y con menor precisión. Este hecho está asociado a que el eje de la máquina busca continuamente la fuerza indicada, sin tener en cuenta el estado de la probeta. Si esta se encontrase, por ejemplo, en el momento de su rotura, donde con la misma fuerza su deformación aumenta en gran medida, provocaría un incremento brusco del desplazamiento del pistón. Se asocia además a la obtención de una mayor resistencia.

Para que los ensayos fuesen lo más idénticos posibles entre ellos y para intentar que la carga se reparta uniformemente sobre las probetas, se colocaron dos pesas más dos láminas de neopreno sobre cada probeta. Este hecho consiguió que la carga se repartiera mejor, evitándose en la medida de lo posible que la irregularidad de la base superior de la probeta diese lugar a una compresión no homogénea. Provocó a su vez que las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas gracias al software informático, no se considerasen lo suficientemente válidas como para obtener conclusiones de ellas. Esto es debido a que los desplazamientos generados poseen una parte asociada a mediciones locales producidas en la zona superior de las probetas provocadas por el aplastamiento de las láminas de neopreno, entre otros. Ligado a este suceso, las deformaciones obtenidas son mayores que las extraídas de las dos técnicas de medidas aplicadas.



Figura 4.1. Máquina universal de ensayos y técnica de medida DIC

Gracias a los resultados conseguidos por ambos métodos de medida se han podido obtener las siguientes características del material:

- **Ley de comportamiento.** Basado en obtener los valores de la tensión (σ) y la deformación (ε) de cada una de las probetas y así definir la curva tensión-deformación del material o ley de comportamiento. Para ello es necesario conocer el área de cada una de las probetas sometidas a la carga de compresión además de la longitud sobre la cual se está midiendo el desplazamiento.

Se fundamenta en las expresiones siguientes:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad \varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$$

- **Resistencia a compresión (f_{ck}).** Este valor está asociado al esfuerzo máximo que soportará el material bajo la carga de compresión a la que está sometida. Corresponde con la tensión máxima que se obtendrá en la curva tensión-deformación.
- **Módulo de elasticidad (E).** En el comportamiento elastico lineal existe una propiedad del material que afecta a la relación tensión-deformación denominada módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young. Coincide con la pendiente de la recta existente en la curva σ - ε asociada al tramo lineal. El valor de E representa una medida de la rigidez del material:

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

A efectos prácticos, se tomará la pendiente de la recta existente entre $1/3 f_{ck}$ y $2/3 f_{ck}$ asegurando de esta forma que nos encontramos en el tramo lineal buscado.

Para conseguir una exposición ordenada de los resultados obtenidos se estructurarán de manera que se expondrán en primer lugar las probetas cilíndricas junto con las curvas asociadas a cada método de medida además de una comparación entre ambos. Seguidamente, se referirán las probetas prismáticas del mismo modo, teniendo en cuenta que estas se instrumentaron con una única banda extensométrica, colocada en la cara posterior a la analizada con el método DIC. A su vez, se analizarán con detalle los resultados obtenidos además del comportamiento de la probeta durante su deformación.

La campaña de ensayos tuvo una duración de 2 semanas, desde el día 18 de Junio del 2018 hasta finalizar este mes. Estas dos semanas incluyen la instalación de las bandas extensométricas y la evaluación de probetas de prueba optimizando así el proceso de ejecución de los ensayos posteriores.

4.1 Métodos de medida empleados

4.1.1 Bandas Extensométricas

Para implementar varias técnicas de medida y obtener distintas referencias con respecto a los parámetros buscados se decidió utilizar bandas extensométricas adheridas a las paredes de cada una de las probetas. Las bandas o galgas extensométricas eléctricas son instrumentos muy usados para medir deformación. Como se comentó en el inicio de este punto, en las probetas prismáticas se colocaron en la cara contraria (Cara B) a la utilizada para medir con las cámaras para así conocer el comportamiento de cada probeta en ambas caras y poder compararlo. Para las probetas cilíndricas, al tener un menor número de ellas, además de la existencia de una incertidumbre inicial con respecto al funcionamiento de las cámaras en este tipo de probetas, se decidió colocar bandas extensométricas en ambos lados de la probeta (Cara A y Cara B).

Introduciendo, a rasgos generales, el funcionamiento de dicho método de medida, se resume en que este aparato mide un voltaje y lo transforma en una medida de deformación ($\mu\epsilon$). Cuando la galga extensométrica se comprime, su resistencia eléctrica se reduce mientras que, cuando se estira, su resistencia aumenta.

La variación de resistencia permite calcular la deformación de la galga extensométrica de forma que:

$$\frac{\Delta R}{R_0} = k \times \epsilon$$

Siendo ΔR el cambio en la resistencia de la galga extensométrica debida a la deformación producida, R_0 la resistencia nominal de la galga, k el factor relacionado con la sensibilidad de deformación y ϵ la deformación que se desea medir. El factor k en el tipo de banda usada es $2,08 \pm 1,0\%$

El tamaño de dicha banda depende del material que se decida ensayar ya que se utiliza aquella que sea de dos a tres veces el tamaño máximo del árido que se encuentre en el material. Así se evita medidas de áridos locales además de conseguir el objetivo basado en buscar una deformación conjunta de la pieza. En nuestro caso, se utilizaron bandas extensométricas de 50 mm y con una resistencia (R_0) de $120 \Omega \pm 0,30\%$ de precisión.

Para garantizar el buen funcionamiento de este instrumento se ejecutó un proceso de encolado a cada una de las probetas. Para ello y con la máxima precaución, evitando tocarlas directamente con la mano ya que la grasa natural de la piel puede afectar a la capa exterior que recubre la galga, se marcó con precisión la ubicación de la galga. Seguidamente se utilizó un pegamento específico para bandas extensométricas y tras la colocación se le aplicó una fuerza constante para conseguir que se adhiriera correctamente.



Figura 4.2. Bandas extensométricas en probetas cilíndricas

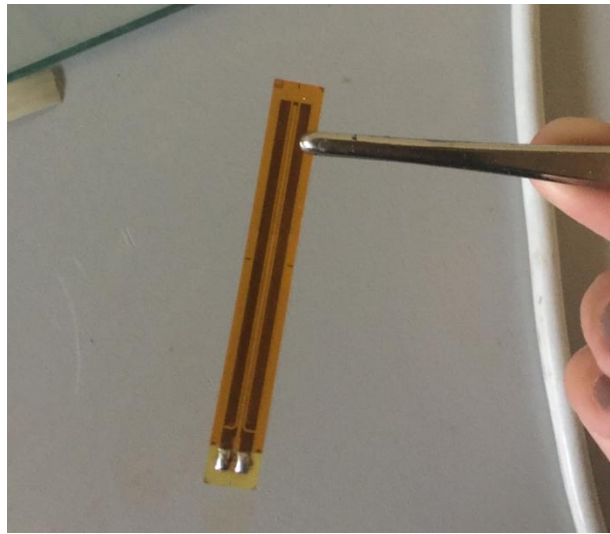


Figura 4.3. Banda extensométrica. Marca HBM

4.1.2 Digital Image Correlation (DIC)

4.1.2.1 Preparación previa y funcionamiento del instrumento de medida

De manera simplificada, la Correlación Digital de Imágenes (DIC) es una técnica óptica que permite obtener una medición de desplazamientos y deformaciones. El método se basa en la toma de imágenes digitales durante el ensayo de una probeta desde su estado inicial, que se considerará como el de referencia, hasta su estado final correspondiente al estado deformado de la probeta. Aunque dicha técnica ofrece desplazamientos y deformaciones 3D de toda la probeta en conjunto, para el presente trabajo, ha sido utilizada para obtener las deformaciones de una serie de líneas imaginarias pintadas estratégicamente sobre la probeta para un posterior análisis de los resultados.



Figura 4.4. Instrumento de medida ARAMIS Adjustable. Marca GOM

Previamente a la realización del ensayo, la probeta se trata para poder aplicar la técnica DIC. Para ello se llevó a cabo un proceso de preparación basado en aplicar pintura blanca sobre la superficie que se va a analizar y posteriormente se genera un moteado aleatorio de color negro con una pintura de grafito para conseguir ciertas referencias con el mejor contraste en la superficie evaluada. Así, el equipo de medida es capaz de identificarlas para llevar a cabo la correlación de imágenes.



Figura 4.5. Proceso de pintado de probeta prismática(P12)

Es necesario realizar un proceso de calibración, preliminar a los ensayos, que consiste en la toma de una serie de fotografías a un patrón en diferentes posiciones y ángulos con el fin de eliminar errores posibles en la colocación de las cámaras. Es un proceso sencillo pero a su vez bastante lento por la sensibilidad de las cámaras y la necesidad de que estas deben captar todos los puntos del patrón. Además es necesario realizar un proceso de enfoque de las cámaras para poner a punto el instrumento para los ensayos.

Tras el acondicionamiento realizado, la máquina está lista para comenzar. Se coloca la probeta sobre la máquina universal y comienza el ensayo tras indicárselo haciendo click a 'ON' en la ventana *ensayo* en el software informático de este mecanismo. Al mismo tiempo, se pone en marcha el instrumento de medida DIC que comenzará a realizar una foto por segundo a la probeta que, posteriormente al acabar el ensayo, procesará dividiendo dichas imágenes en pequeños cuadrados virtuales denominados facetas. A partir de estos, permite obtener el vector de desplazamientos en cada conjunto de facetas procesadas. Es necesario para más exactitud, colocar, al acabar, una máscara que limita la zona en la que se busca obtener los resultados.

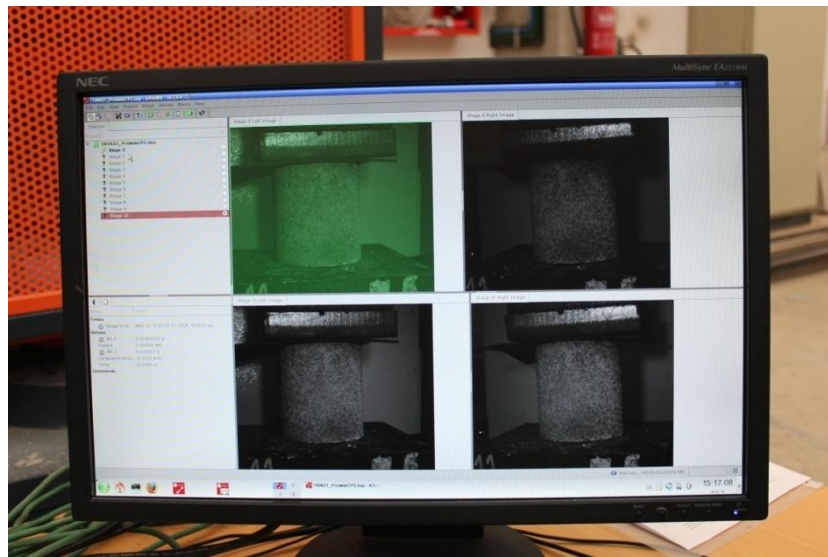


Figura 4.6. Correlación de imágenes de una probeta cilíndrica

4.1.2.2 Obtención de resultados a través del software informático

Tras la ejecución de los ensayos a compresión simple, fue necesario un proceso de obtención de datos. Para ello el programa permite dibujar puntos y líneas imaginarias sobre las imágenes recopiladas para así obtener las deformaciones existentes en esa línea, es decir, la diferencia entre el estado inicial y final en términos de desplazamientos entre los dos puntos que la conforman. Se definieron un total de 23 puntos o, como denomina el programa, *Stage Points* y a partir de estos puntos se dibujaron las líneas. De forma visual, se implementó el siguiente esquema:

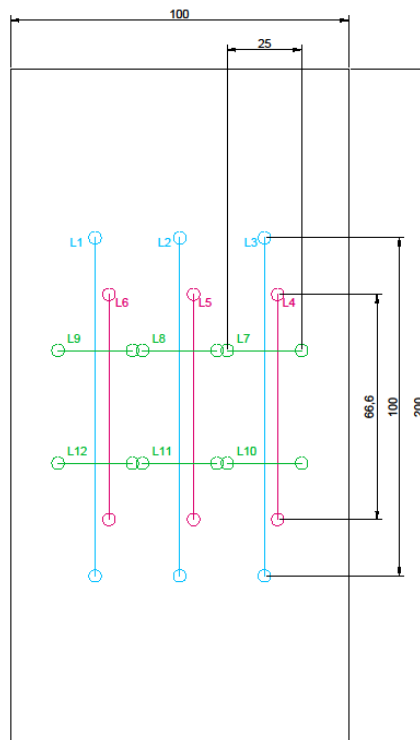


Figura 4.7. Esquema de líneas sobre probeta prismática

Tanto para las probetas cilíndricas como para las probetas prismáticas, el criterio de definición de líneas seguido fue el mismo. Las de mayor longitud, es decir, L1, L2 y L3 miden la mitad de la altura de la probeta, mientras que L4, L5 y L6 corresponde con $H/3$, siendo H la altura de la muestra. A todas las líneas nombradas se les denominarán **líneas longitudinales** ya que atraviesan la probeta de forma vertical.

Para las **líneas transversales**, L7, L8, L9, L10, L11, y L12, se consideró apropiada una medida de $H/4$ en todas ellas.

El colocar las líneas longitudinales con esta disposición tiene como objetivo comparar qué sucede en la zona central y en ambos extremos de la probeta, además de conocer si posee distinta influencia la zona superior e inferior. Esto se consigue con las líneas de mayor longitud. Del mismo modo, se busca conocer cómo es el comportamiento transversal de las probetas colocando las líneas en horizontal.

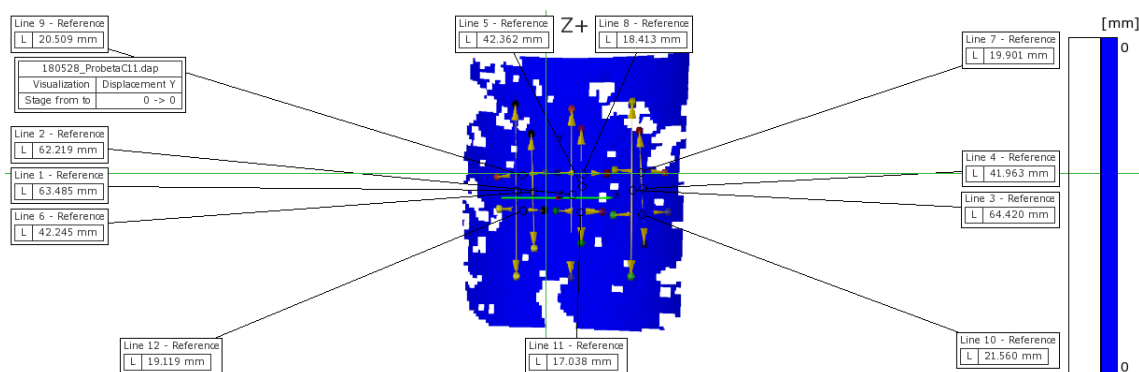


Figura 4.8. Stage Points y líneas dibujadas sobre probeta cilíndrica (C11)

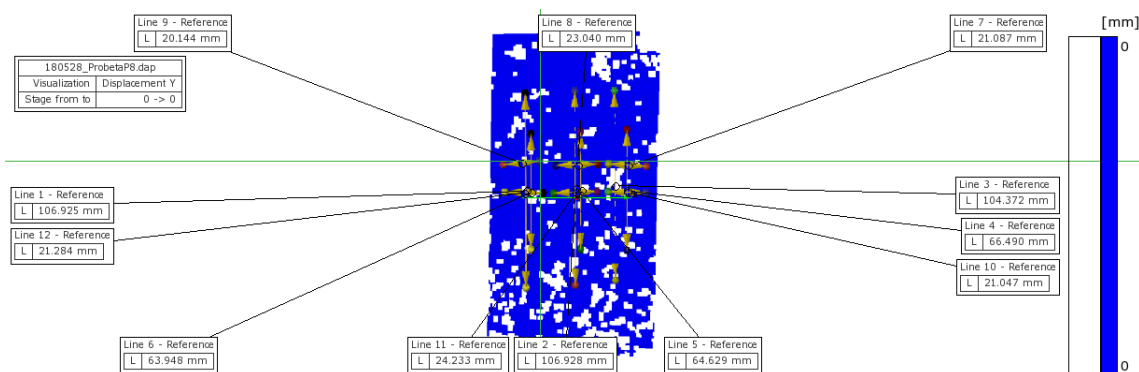


Figura 4.9. Stage Points y líneas dibujadas sobre probeta prismática(P8)

Como puede apreciarse en las figuras anteriores, existen zonas que las cámaras no consiguieron captar con totalidad lo que se traduce en que, a la hora de obtener los datos, en esas zonas no exista valor, generando espacios en blanco en la tabla de resultados.

Tras crear estas líneas se generaron archivos .txt en forma de tablas donde, la primera columna mostraba la deformación en $\mu\text{m}/\text{m}$ de cada línea y la variable fuerza (kN) en una segunda columna. Con estos datos se obtuvieron las curvas tensión-deformación objetivo de cada probeta.



Figura 4.10. Métodos de medida utilizados: bandas extensométricas y Digital Image Correlation (DIC)

4.2 Resultados de los ensayos

4.2.1 Ensayos de compresión simple sobre probetas cilíndricas

Como se ha descrito en el punto anterior, todas las probetas fueron ensayadas en la máquina universal de ensayos tras finalizar el proceso de curado. Se procedió previamente a realizar mediciones con un calibre de las dimensiones de cada probeta y así comprobar si se había producido una variación notable del tamaño, provocado por una posible retracción. Estas dimensiones están definidas en la tabla 4.2. Las probetas fueron fabricadas en un molde metálico, consiguiendo que las dimensiones una vez acabada la fabricación quedasen muy próximas a las objetivo ya que estos moldes no se flexionaban en el momento de la compactación como sí ocurría con los moldes de madera. Como consecuencia se observa en el aspecto exterior una superficie más lisa y regular.

Cada probeta fue marcada, en una etiqueta adjunta, con su fecha de fabricación y su fecha de ensayo para obtener un control de la edad como puede apreciarse en la figura 4.11. Se realizó a su vez un control de la humedad que finalmente poseía cada probeta.



Figura 4.11. Ensayo a compresión simple de una probeta cilíndrica (C9)

Probetas Cilíndricas						
Probeta	EDAD (Días)	ϕ (mm)	H(mm)	Banda(Cara A o B)	DIC	Humedad(%)
C3	42	101,53	113	A,B	SÍ	0,81
C4	42	101,875	112	A,B	SÍ	1,026
C5	42	101,36	113	A,B	SÍ	0,7299
C9	44	101,94	112	A,B	SÍ	1,8
C11	44	101,24	113	B	SÍ	0.2478
CP2	36	101,91	113	NO	SÍ	0,782

Tabla 4.2. Edad, dimensiones, humedad final y método de medida de cada probeta cilíndrica

El control en desplazamientos se programó siguiendo tres rampas de carga:

- Rampa 1: 3mm/min hasta 1 mm
- Rampa 2: 1 mm/min hasta 8 mm
- Rampa 3: 4 mm/min hasta 15 mm

Estas rampas se decidieron para que el comienzo del ensayo, correspondiendo al asentamiento del pistón sobre la probeta y al inicio de la compresión, sea breve. Seguidamente, la segunda rampa corresponde a la parte importante y de la cual se busca un análisis más riguroso. Es por ello que se redujo la velocidad del ensayo. Para finalizar, se vuelve a aumentar la velocidad hasta llegar al desmoronamiento de la probeta o hasta que la curva ofrecida se estabiliza formando una asíntota horizontal.

Se muestra a continuación, los valores de la resistencia a compresión de cada una de las probetas en forma de gráfico de barras. Se incluye el valor medio del conjunto además de la desviación típica que informa de la dispersión de los resultados.

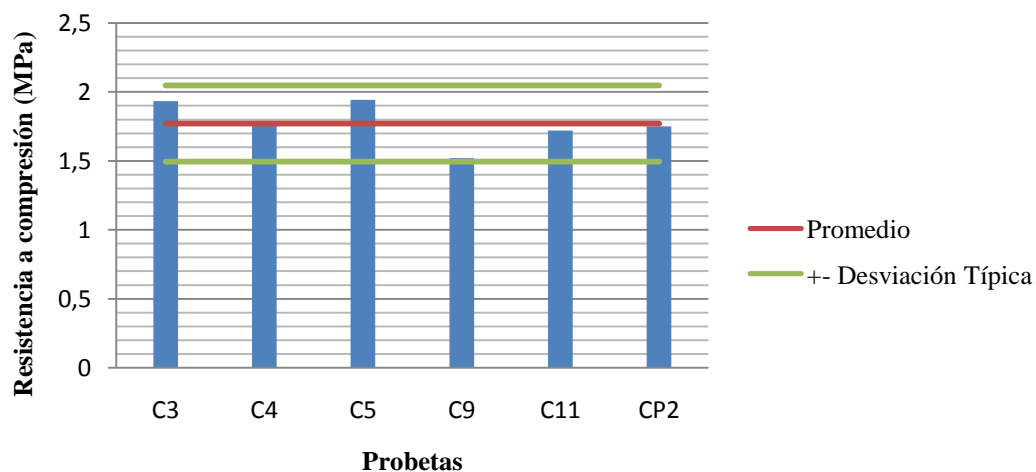


Figura 4.12. Resistencia a compresión (f_{ck}) de probetas cilíndricas

Probeta	f_{ck}
C3	1,93433014
C4	1,75426541
C5	1,94371156
C9	1,52059935
C11	1,71961555
CP2	1,75007734

Tabla 4.3. Valores resistencia a compresión (f_{ck}) de probetas cilíndricas

4.2.1.1 Curvas tensión-deformación según bandas extensométricas

Se presentan las curvas tensión-deformación obtenidas gracias a las bandas extensométricas adheridas tanto a la cara A, o lado de la probeta que también fue ensayado con el método DIC, como en la cara B o lado contrario. La probeta C11 no pudo ser ensayada en la cara A ya que una vez pintada y conectadas las bandas extensométricas a la máquina, resultó no funcionar.

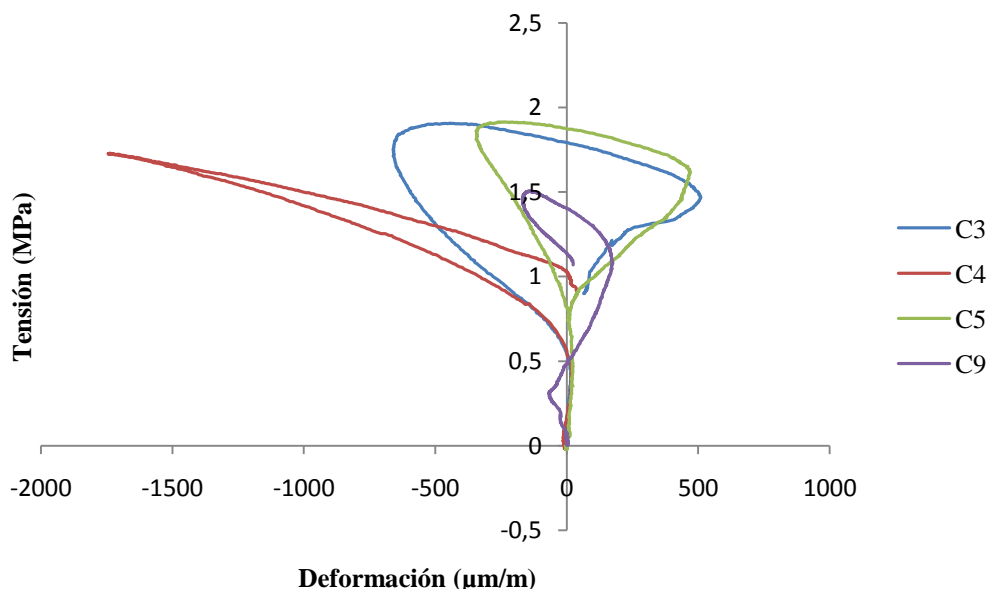


Figura 4.13. Curvas tensión-deformación **cara A** de probetas cilíndricas según bandas extensométricas

Aparecen tres tendencias de curvas en estas cuatro probetas instrumentadas. En primer lugar la probeta C4, siendo esta la que ofrece la mayor deformación de todas, presenta un aspecto similar a una curva tensión-deformación típica, exceptuando el comportamiento al llegar al valor máximo de la tensión, mostrando una tracción brusca.

La siguiente tendencia está asociada a las curvas de las probetas C3 y C5 arrojando un comportamiento similar entre ellas aunque C3 posee una mayor deformación. En ambos casos, al llegar prácticamente al valor máximo, comienzan a "traccionarse" pero de una forma más suave que en el caso anterior, llegando incluso a deformaciones positivas.

La probeta C9 es aquella que posee un comportamiento singular asociado a una corta compresión inicial, seguida de una tracción con valores positivos de deformación, volviendo a comprimirse y acabando en una nueva tracción al llegar a su valor máximo.

La tracción última que presentan todas las curvas puede estar asociado a la relajación que ocurre en la banda al despegarse de la probeta. A lo anterior se le une la heterogeneidad existente en el material, presentando múltiples comportamientos a pesar de realizar los ensayos con minuciosidad y detalle para que no exista apenas diferencia entre ellos. Las bandas extensométricas muestran situaciones locales relacionadas con el movimiento de los áridos en el interior de la probeta, que provocan tracciones y compresiones entre dos puntos a lo largo del ensayo.

En el apartado 4.2.1.3, se mostrará una comparación entre ambos métodos de medida, indicando si los resultados se pueden considerar válidos o no, superponiendo las curvas obtenidas tanto con las bandas extensométricas como con las cámaras ya que midieron en la misma cara de la probeta.

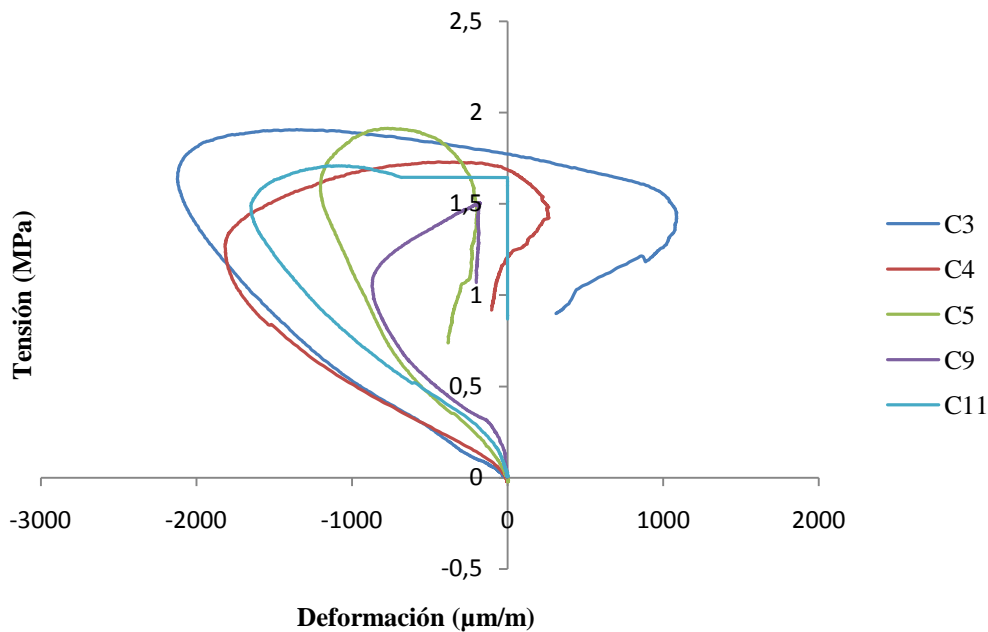


Figura 4.14. Curvas tensión-deformación **Cara B** de probetas cilíndricas según bandas extensométricas

En el caso de la **cara B**, el comportamiento es similar en todas las probetas comenzando con un tramo de deformaciones negativas que va aumentando mientras aumenta la tensión. El valor máximo de las deformaciones está asociado a la probeta C3.

Se puede apreciar que el comportamiento en C4 y C9 es totalmente distinto en cada cara mientras que C3 y C5 poseen curvas con tendencias similares. Se producen mayores deformaciones en la cara B o cara posterior en todos los casos. Se observa en la cara B que la aplicación de la compresión comienza muy cercana al inicio del movimiento del pistón. Comparando con la cara A, esta aplicación resulta más tardía, no apareciendo deformaciones hasta aproximadamente 0,5 MPa en tres de las cuatro probetas. Se deduce, por tanto, que existía un desnivel asociado a la aplicación de la carga entre las caras, no siendo homogénea en su origen.

4.2.1.2 Curvas tensión-deformación según DIC en cara A

Se expondrán en el presente apartado algunas de las curvas, realizadas a partir de la obtención de datos, con los comportamientos más significativos: C3, C4, C5 y C9. De cada probeta elegida se mostrará las curvas de las líneas tanto longitudinales como transversales realizando un análisis del comportamiento de cada probeta. Se estudiará por separado el comportamiento tanto longitudinal como transversal. Se presentará, concluyendo este apartado, el conjunto de curvas promedio de todas las probetas cilíndricas. El esquema de las líneas se encuentra al comienzo de este apartado, en la figura 4.7.

Se incluye, al finalizar la memoria, un anexo donde se adjuntan todas las gráficas obtenidas para su posible consulta.

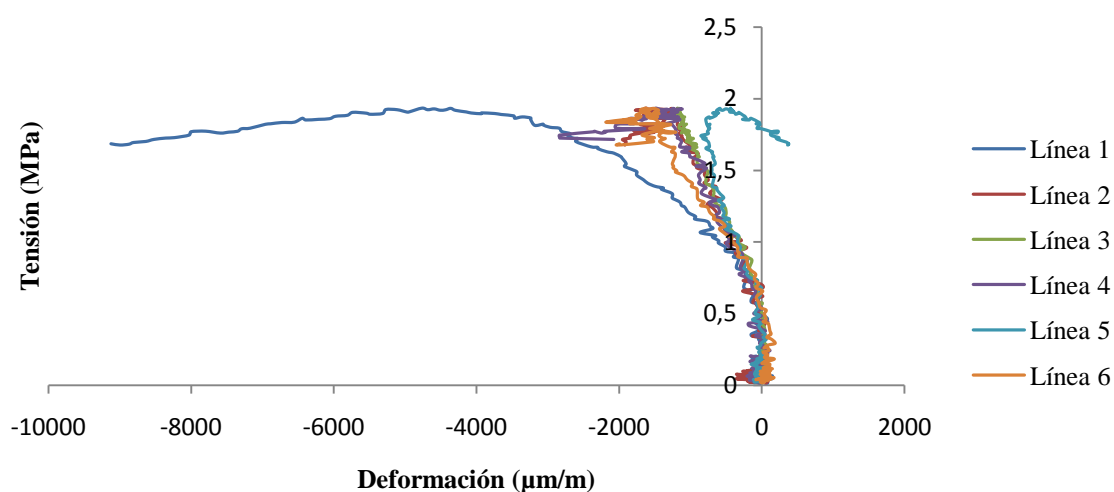


Figura 4.15. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C3

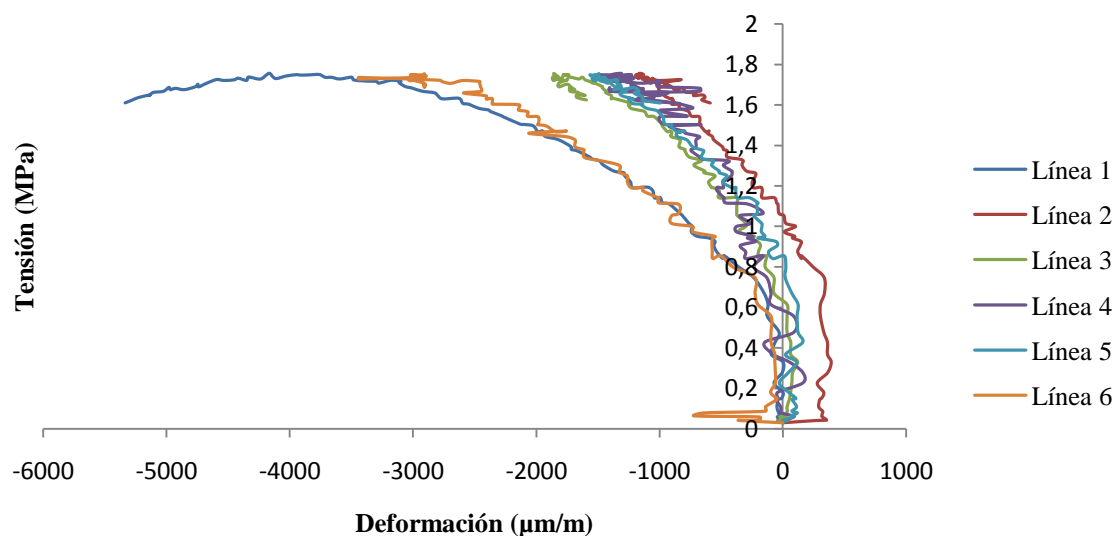


Figura 4.16. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C4

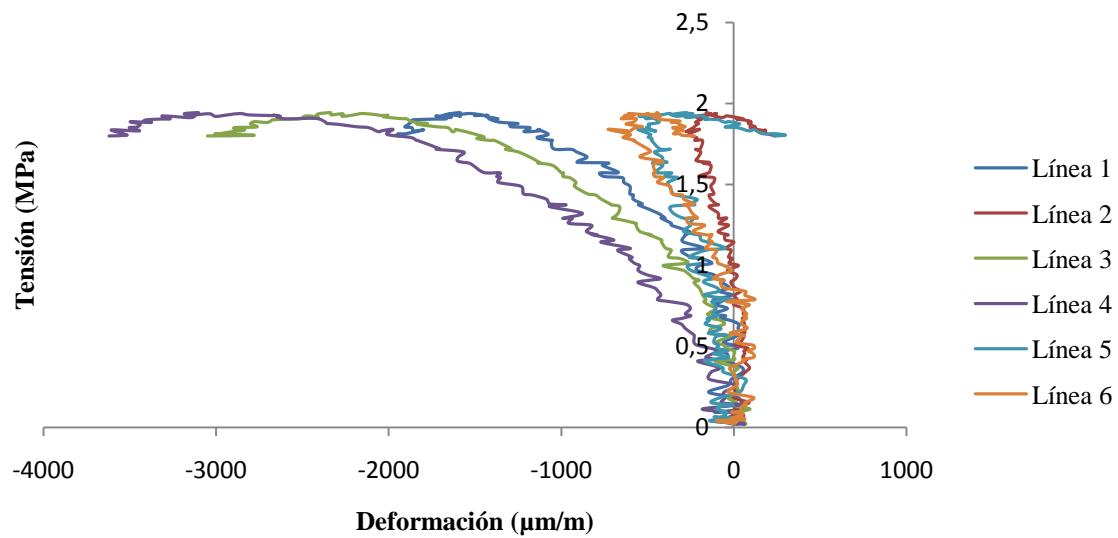


Figura 4.17. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C5

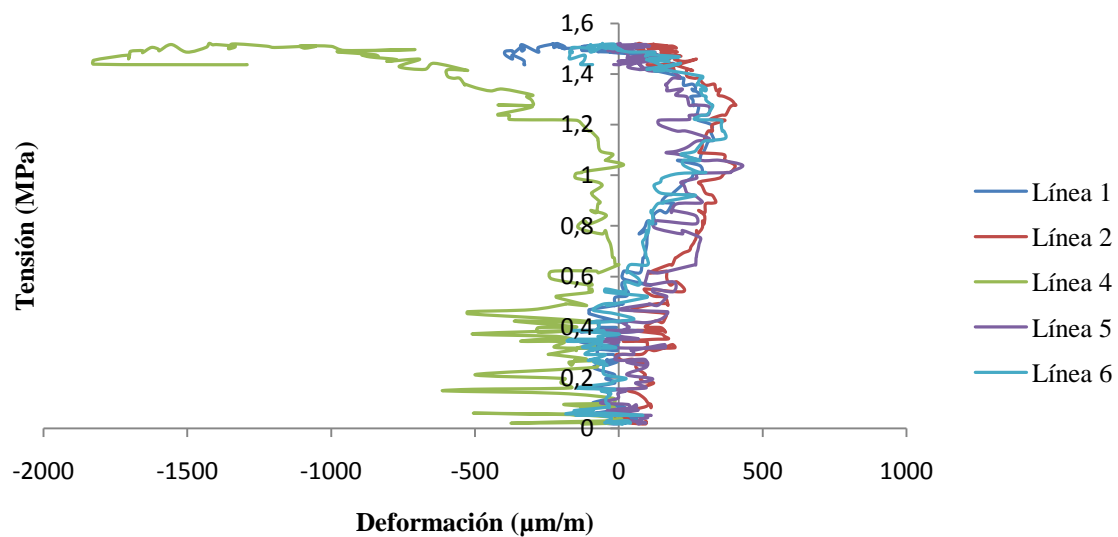


Figura 4.18. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C9

El punto más llamativo que caracteriza las gráficas asociadas al comportamiento longitudinal, es decir, en la dirección de la compresión, es la disparidad de resultados entre líneas de una misma probeta. Al inicio, todas las curvas presentan ruido debido a un problema de captación de información por parte de las cámaras o de asentamiento de los áridos, siendo complicada la obtención de conclusiones en esta zona.

En la probeta C4 las curvas de todas las líneas presentan una tendencia similar. No obstante muestra, de forma exclusiva en la línea L2, es decir, en el centro de la probeta, deformaciones positivas. Este suceso parece estar asociado a un fallo en la toma de datos ya que al inicio parte de aproximadamente 300 $\mu\text{m/m}$, continuando la deformación a partir de este valor.

En todos los casos el mayor valor de la deformación ocurre en los extremos de la cara de la probeta, aunque no se distingue si en la zona izquierda o en la derecha. En dos casos resulta mayor la deformación en la izquierda y en los otros dos en la derecha. Con respecto al lado izquierdo de las probetas, en la mayoría de los casos, la línea más larga, L1, coincide con la mayor deformación, sin embargo en el lado derecho, este hecho es contrario: la mayor deformación ocurre en la línea corta del extremo, L4, en 3 de 5 curvas. Este suceso se encuentra asociado a la distribución de los áridos en el interior de las probetas además de la existencia de huecos entre ellos que permite el movimiento de los granos.

El comportamiento de las probetas C3 y C5 resulta similar. En ellas aparecen curvas con un comportamiento distintivo, como en la línea 5 de ambas probetas, que comienzan con una compresión hasta el valor de la tensión máxima donde cambia su disposición y comienza a traccionarse. Cabe destacar que en la probeta C3, el comportamiento de las líneas L2 y L5, es decir, en el centro de la probeta, resultan completamente distintos encontrándose en la misma vertical. Este suceso le ocurre a la probeta C5 pero en su caso con las líneas L1 y L6, esto es, en el extremo izquierdo de la probeta, apoyando aún más que las situaciones obtenidas asociadas a una gran dispersión en los datos y grandes diferencias entre curvas es debido a la colocación de los áridos en el interior de la probeta. Mientras se va produciendo la compresión, los distintos áridos comienzan a moverse y a encontrarse unos con otros generando tracciones locales.

La probeta C9, ofreciendo sus curvas en la figura 4.18, comienza con unas deformaciones positivas en todas las líneas existentes, exceptuando la línea 4, sin embargo, cabe recalcar que es la probeta que ofrece más ruido de todas, lo que provoca una incertidumbre con respecto a los resultados obtenidos. A pesar de ello, la tendencia general de todas las curvas es la misma. Esta es la probeta que muestra menores deformaciones.

A continuación se presentan las gráficas asociadas a las **líneas transversales** de las probetas:

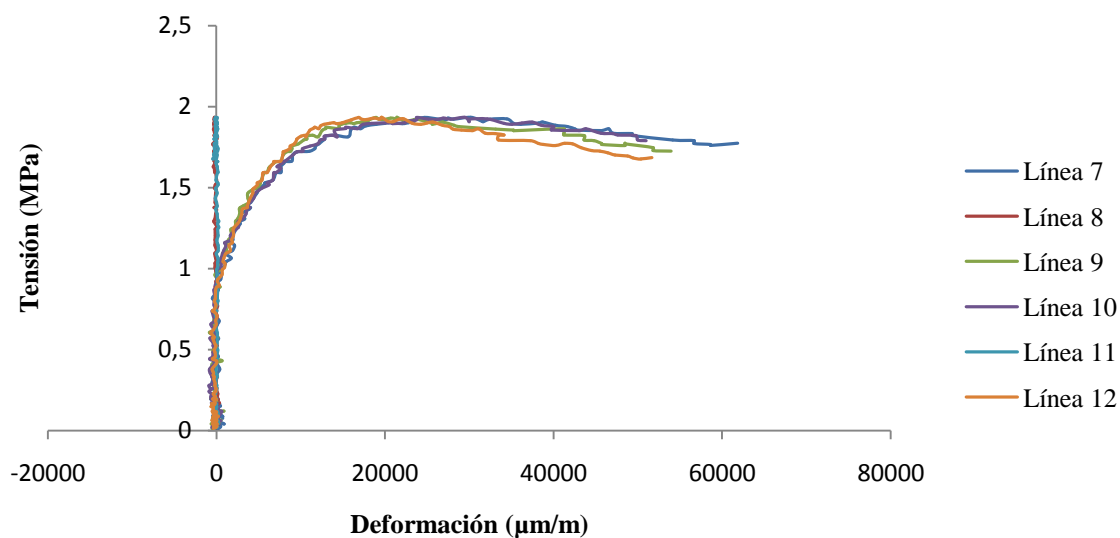


Figura 4.19. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C3

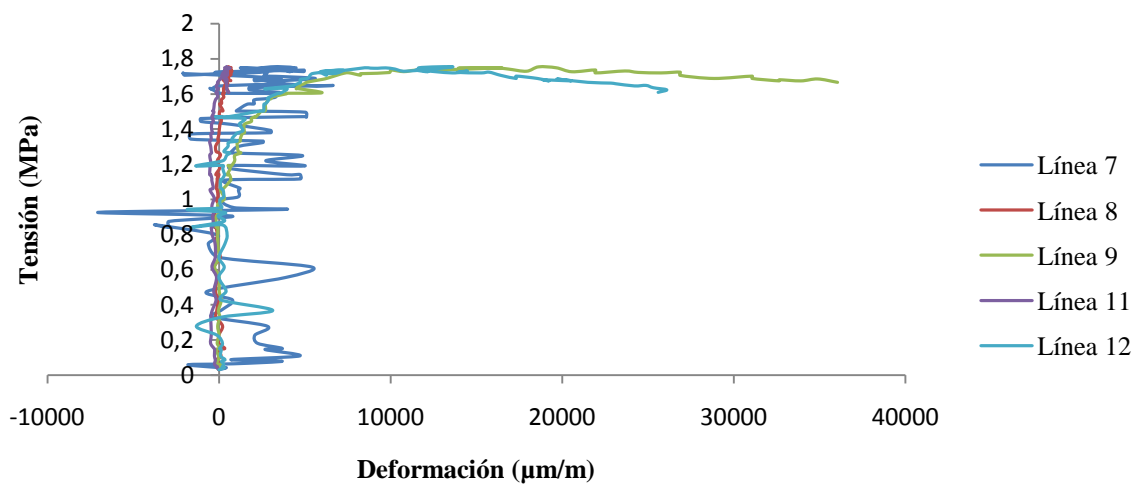


Figura 4.20. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C4

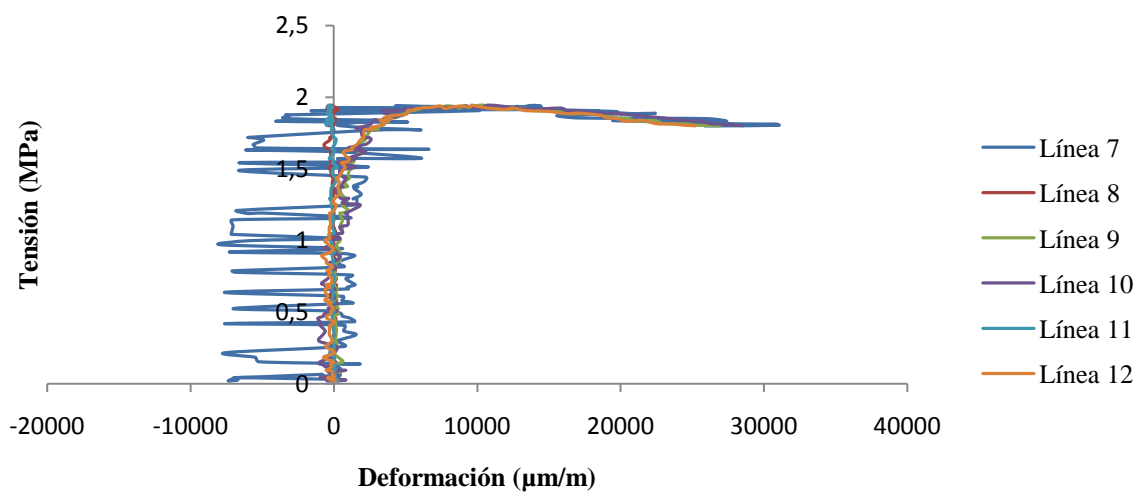


Figura 4.21. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C5

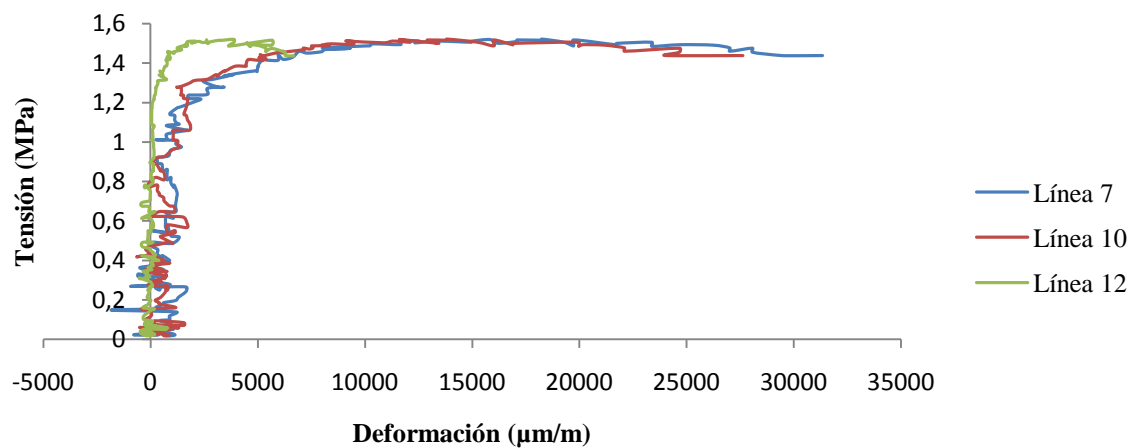


Figura 4.22. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C9

Las líneas transversales presentan en general, un comportamiento similar entre probetas, sin aparecer diferencias que resulten llamativas como en el caso anterior. Resulta conveniente comentar que estas gráficas fueron más difíciles de obtener por la gran cantidad de zonas sin captar por las cámaras, ocasionando gráficos con un menor número de líneas además de la manifestación de ruido excesivo en otras decidiendo no considerarlas como válidas. Este hecho se puede apreciar en la figura 4.20 donde la línea 7 asociada a la probeta C4 presenta este fenómeno.

El comportamiento general comienza con un tramo inicial en el que apenas se producen deformaciones mientras aumenta la presión ejercida. En la mayoría de las probetas, una vez llegado a 1 MPa se originan deformaciones notables llegando, incluso, a obtener valores más elevados que de forma longitudinal. Presentan unas deformaciones positivas asociadas al efecto Poisson. Este hecho se caracteriza por provocar deformaciones de manera transversal al sentido de la sollicitación. Es el coeficiente o módulo de Poisson(ν) el valor que mide este fenómeno. A todo lo anterior se le incluye la fricción existente entre la probeta y las placas dificultando la expansión de los extremos. Este hecho llamado abarrilamiento se aprecia especialmente en la zona central de las probetas. Puede originar zonas internas no deformadas y se minimizaría con una lubricación adecuada.



Figura 4.23. Abarrilamiento de probeta cilíndrica

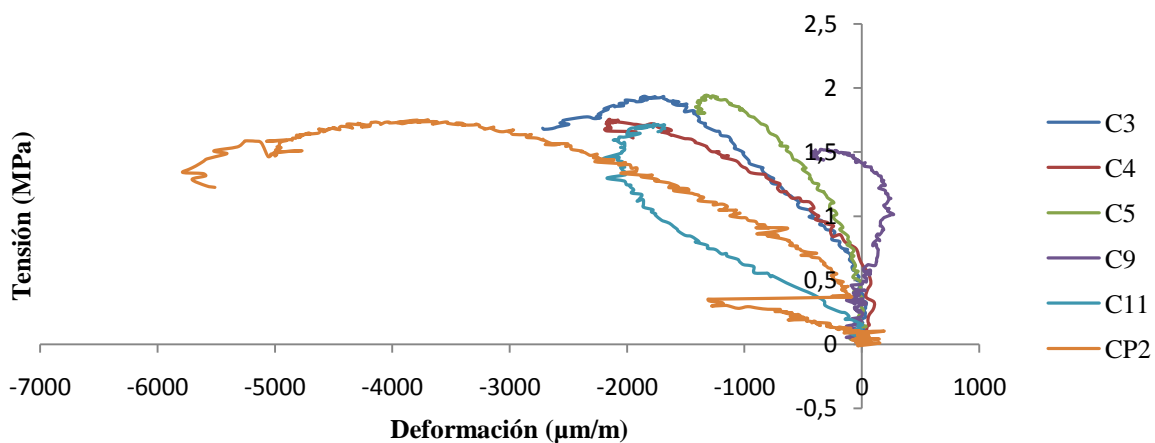


Figura 4.24. Curvas tension-deformación promedio de líneas longitudinales de probetas cilíndricas

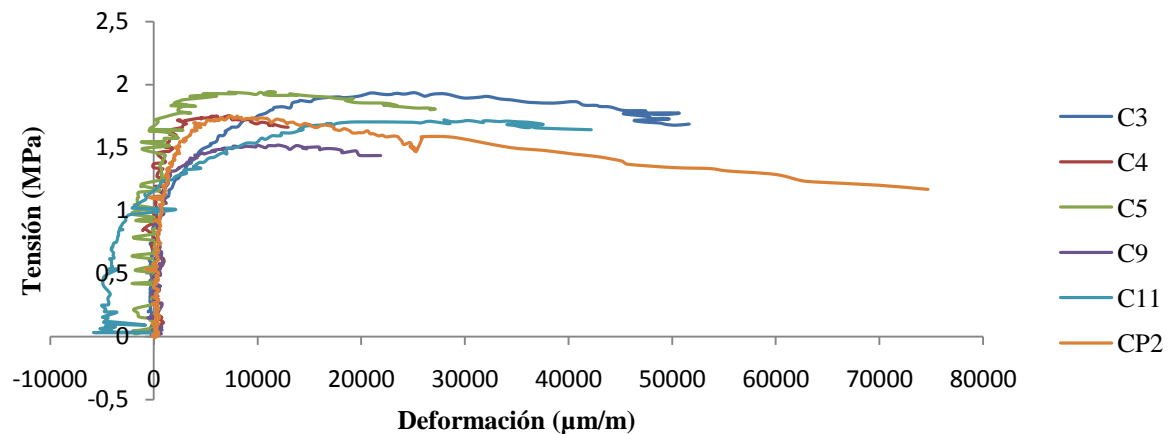


Figura 4.25. Curvas tensión-deformación promedio de líneas transversales de probetas cilíndricas.

4.2.1.3 Comparación curvas σ - ϵ obtenidas por bandas extensométricas y DIC

A continuación, se presentan gráficas superpuestas que resultan útiles para obtener una comparativa entre ambas técnicas de medida. Se ilustra en una misma gráfica el comportamiento ofrecido por cada probeta. Se incluyen de nuevo las probetas C3, C4, C5 y C9. Las curvas de las bandas han sido ligeramente modificadas eliminando el tramo final de cada una y así obtener una visión más clara de las partes relevantes de las curvas.

En cada una de ellas aparecen las curvas asociadas a las líneas longitudinales en color gris, obtenidas por el método DIC, para resaltar así la curva promedio.

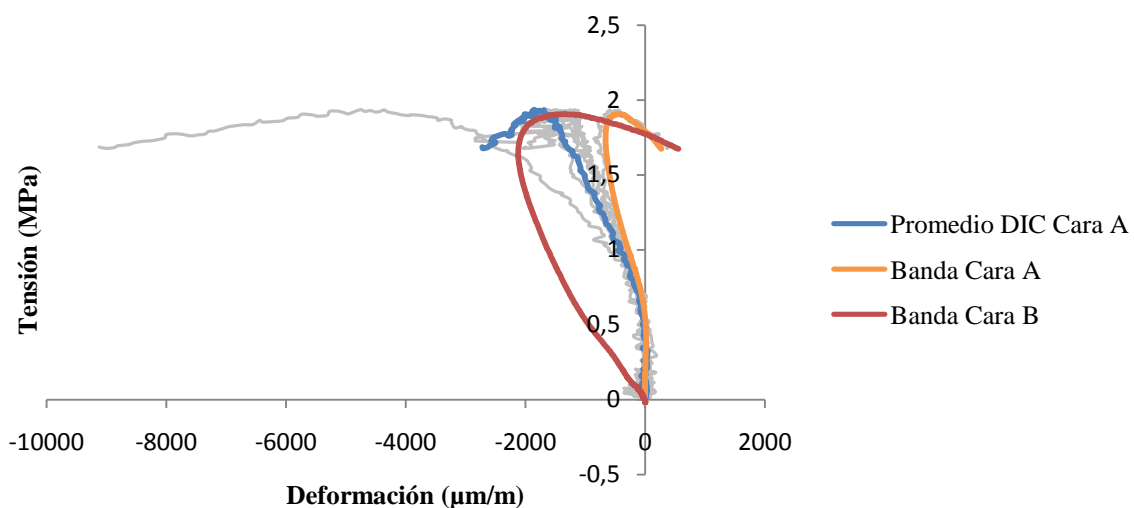


Figura 4.26. Curva tensión-deformación de probeta C3 según bandas extensométricas frente a DIC

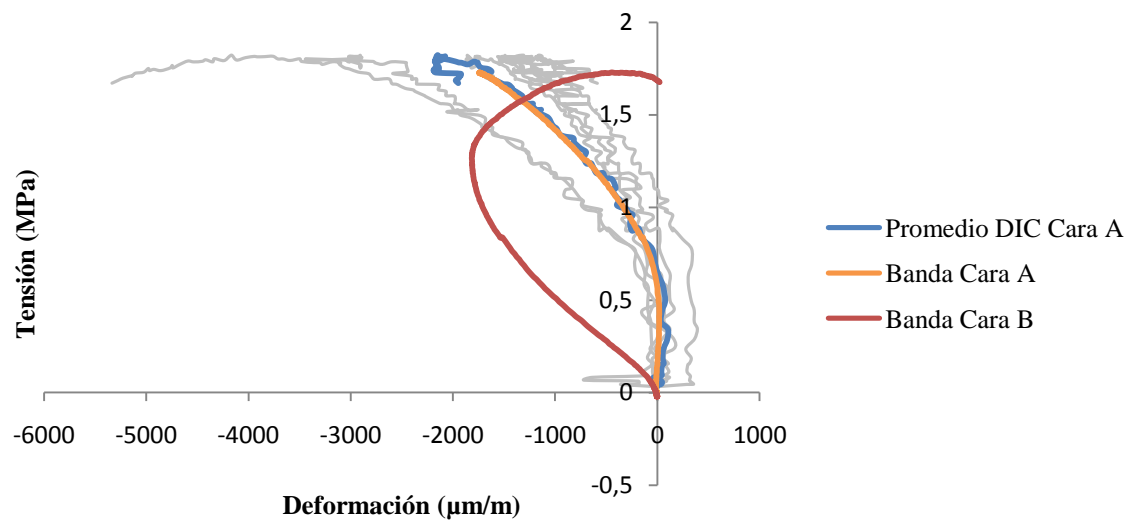


Figura 4.27. Curva tensión-deformación de probeta C4 según bandas extensométricas frente a DIC

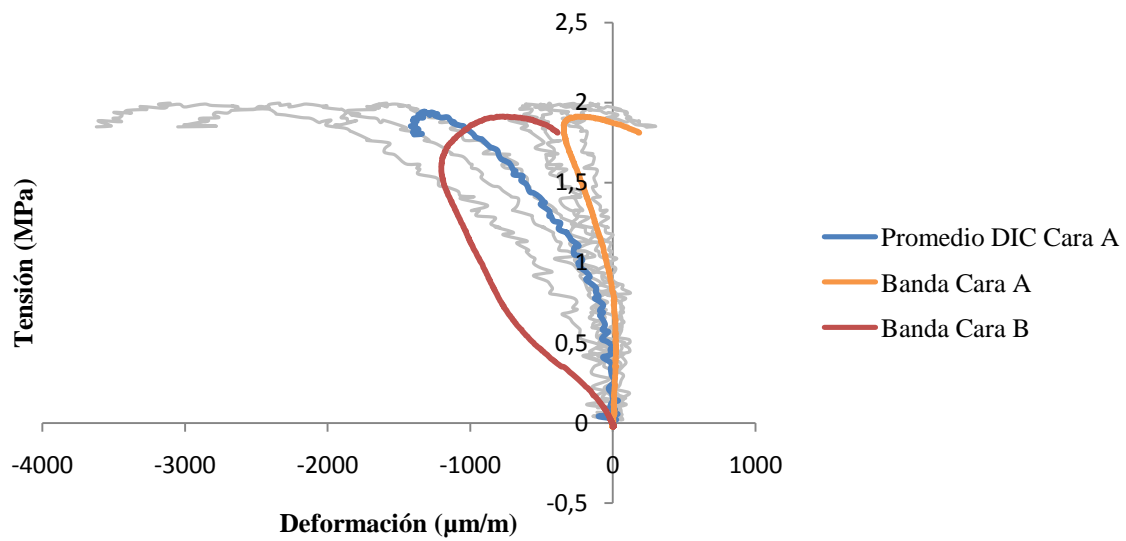


Figura 4.28. Curva tensión-deformación de probeta C5 según bandas extensométricas frente a DIC

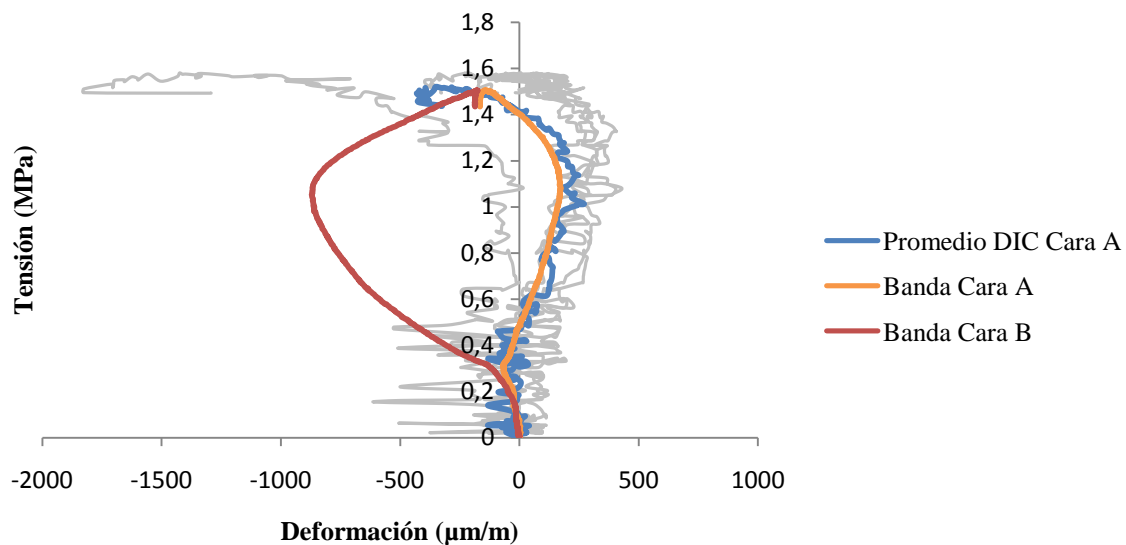


Figura 4.29. Curva tensión-deformación de probeta C9 según bandas extensométricas frente a DIC

El primer punto a destacar es que ambos métodos comparten grado de magnitud en cuanto a deformaciones, aunque existan distintos comportamientos, dando indicios a la validez de los resultados obtenidos. Con respecto a las bandas extensométricas se partía de una mayor incertidumbre ya que en el laboratorio no existía experiencia en la adherencia y funcionamiento de este instrumento de medida a probetas fabricadas con este material.

En la cara A o lado de la probeta que fue analizado con ambos métodos de medida, resulta destacable que la banda colocada justo en el centro de la probeta, ofrece, en prácticamente todos los casos, el mismo comportamiento que la curva correspondiente a la línea 2 o línea 5. Estas líneas coinciden con las colocadas de forma imaginaria en el centro de la probeta coincidiendo así con la localización de la bandas. Este hecho apoya la validez de ambos métodos de medida, siendo métodos con características totalmente distintas que miden de forma correcta las deformaciones de la probeta. Se apoya aún más la existencia de comportamientos diversos de forma local y se intensifica su manifestación con el hecho de realizar mediciones y ensayos sobre probetas en pequeña escala. Si estos ensayos se realizasen a muros o construcciones de mayor tamaño, probablemente los resultados obtenidos se homogeneizarían ya que estos aspectos locales se difuminarían en función del tamaño de la muestra.

A rasgos generales, se puede considerar correcto utilizar como referencia el promedio ofrecido por las curvas del método DIC, puesto que considera un conjunto de líneas longitudinales en una cara concreta obteniendo así el comportamiento en su totalidad y no una situación particular de una zona de la probeta como muestra las bandas extensométricas. Aún así, en dos de los cuatro casos considerados, el promedio coincide con la curva ofrecida por la banda extensométrica. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 4.29. La curva promedio del método DIC medido en la cara A de la probeta C9 es análoga a la ofrecida por la banda extensométrica adherida en la misma cara. Se puede afirmar, por tanto, gracias a la superposición de gráficas que dicha probeta posee un comportamiento diferente al resto.

En la cara B o cara posterior, la deformación comienza, de forma brusca, al inicio del ensayo en todos los casos, generando una incertidumbre de si realmente la carga aportada por el eje móvil se encontrase totalmente centrada. Todas las curvas confieren un comportamiento similar en todas las probetas.

Un aspecto a destacar con respecto a ambos métodos de medidas es el número de datos que ofrece cada uno en su tabla de resultados asociada. Las bandas extensométricas arrojan una gran cantidad de valores en comparación con el método DIC dando lugar a unas curvas más suaves y precisas caracterizadas por un sistema de toma de medidas progresivo y analógico.

4.2.1.4 Obtención del módulo de elasticidad

El **módulo de elasticidad** (E) ha sido obtenido a partir de las curvas generadas con las distintas técnicas de medida utilizadas: bandas extensométricas y método de correlación de imágenes digitales (DIC). Para ello se calcularon los valores de $1/3 f_{ck}$, $2/3 f_{ck}$ y las deformaciones asociadas a estas tensiones. El valor del módulo de elasticidad debería coincidir con la pendiente de la recta que une ambos valores. Se utiliza este criterio para asegurar que se escogen en el tramo lineal de la curva tensión-deformación. Para el caso de la técnica DIC, estos valores calculados se extrajeron de las curvas promedio obtenidas de las líneas longitudinales de cada probeta. De esta forma se consigue obtener una situación global de la probeta evitando evaluar dicha propiedad de forma local.

Para corroborar lo anterior, se comparó la pendiente ya calculada, con el valor de la obtenida de la línea de tendencia de todos los puntos entre ambos valores, $1/3 f_{ck}$ y $2/3 f_{ck}$, resultantes de las curvas de ambos métodos de medida:

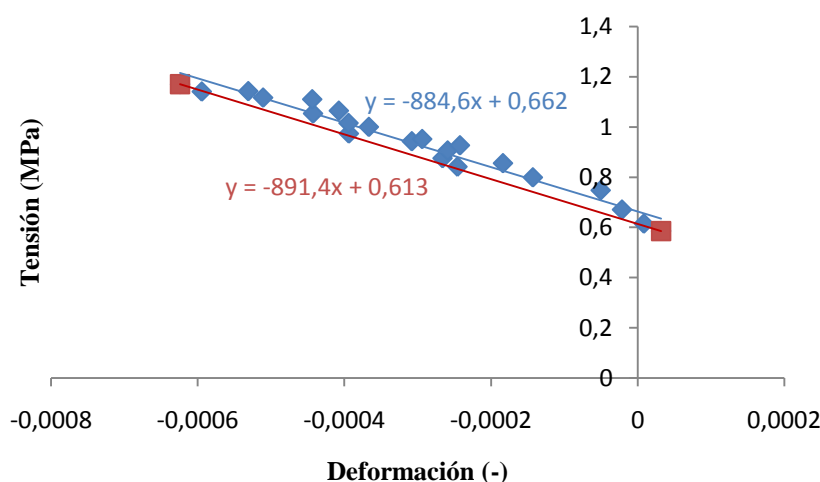


Figura 4.30. Ejemplo comparación de pendientes: recta entre $1/3 f_{ck}$ y $2/3 f_{ck}$ (rojo) y línea de tendencia (azul) para probeta C4

Como ofrece la figura 4.30, además de realizar dicha comprobación en todas las probetas, las pendientes son muy similares dando por aceptada la hipótesis de localización en el tramo lineal. Cabe destacar que aparece una dispersión mucho mayor que en los valores obtenidos de la resistencia a compresión de cada probeta. Este hecho se encuentra asociado a la forma de obtención de medidas, es decir, mientras en el método DIC se analiza la pendiente de la curva promedio en la que considera un total de doce líneas en la cara de la probeta, en la banda extensométrica se considera una única línea, presentando, en reiteradas ocasiones comportamientos locales de la probeta. Un ejemplo se encuentra en la probeta C3, donde en la figura 4.26 complementada con la figura 4.15 muestran cómo la curva asociada a la banda extensométrica en la cara A y la línea 5 presentan el mismo comportamiento. Si se comparan ambas pendientes, resultan prácticamente idénticas.

Los valores del módulo de elasticidad o módulo de Young son los siguientes según cada técnica de medida:

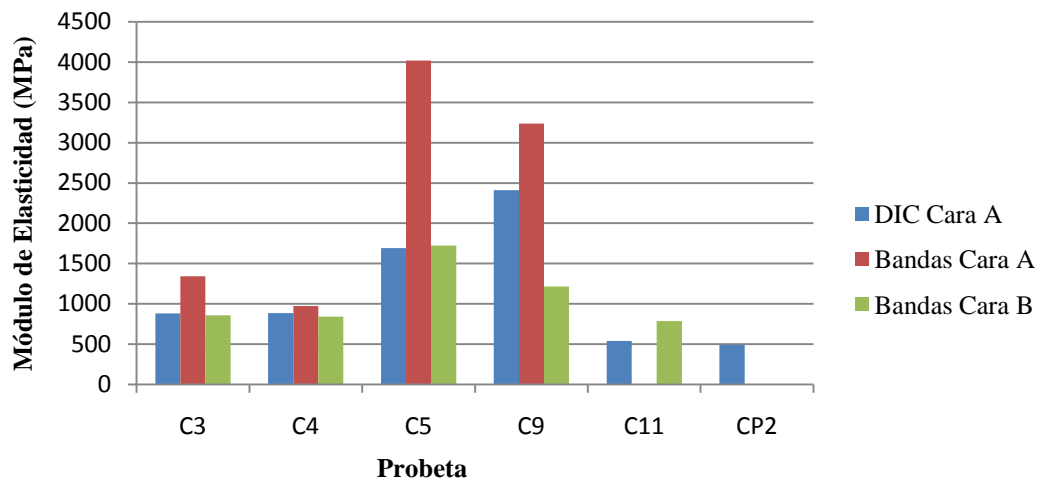


Figura 4.31. Módulo de elasticidad (E) de probetas cilíndricas según cara y método de medida

Probeta	f_{ck}	E Banda Cara A	E DIC Cara A	E Banda Cara B
C3	1,93433014	1342,57709	882,988566	858,2107127
C4	1,754265411	975,065824	884,65133	842,6214983
C5	1,94371156	4019,17923	1690,68337	1723,97745
C9	1,52059935	3237,90628	2412,07912	1217,23886
C11	1,71961555		541,198946	787,54655
CP2	1,75007734		491,605181	

Tabla 4.4. Valores resistencia a compresión(f_{ck}) y módulo de elasticidad(E) según método de medida: bandas extensométricas y DIC en probetas cilíndricas

4.2.2 Ensayos de compresión simple sobre probetas prismáticas

Este apartado recoge los resultados obtenidos referidos a las probetas prismáticas a partir de los dos métodos de medida utilizados: bandas extensométricas y correlación de imágenes digitales (DIC). Una vez pasadas las cuatro semanas de curado de las probetas, se procedió a la preparación previa de los ensayos. Para ello, se adhirió en una cara una banda extensométrica, colocada en el centro de la misma, y la cara opuesta se preparó convenientemente para que fuese captada por las cámaras del método DIC y así conseguir referencias de ambos lados.

El objetivo, en cuanto a dimensiones se refiere, era obtener una probeta de 100*100*200 mm, sin embargo, por motivos relacionados al proceso de fabricación, no se alcanzaron exactamente dichas medidas. En la tabla 4.5, se detallan las dimensiones reales de cada probeta obtenida con un calibre días antes del ensayo. De esta forma se definirán con más rigurosidad los valores de las tensiones.



Figura 4.32. Ensayo a compresión probeta prismática P19

Probetas Prismáticas							
Probeta	EDAD (Días)	D(mm)	L(mm)	H(mm)	Banda(Cara A o B)	DIC	Humedad(%)
P5	46	103,74	100,89	200	B	SI	0,72
P8	44	101,98	100,46	203	B	SI	0,346
P10	43	103	101	196	B	SI	0,275
P11	43	103,23	101,98	199	B	SI	0,879
P12	43	102,72	102,5	200	B	SI	1,121
P15	42	102,51	101,15	201	B	SI	0,705
P17	42	102,41	101,2	198	B	SI	0,977
P19	41	102,88	101,15	200	B	SI	0,474

Tabla 4.5. Edad, dimensiones y método de medida de cada probeta prismática

A pesar de respetar las cuatro semanas de secado de las probetas, las dimensiones antes y después de este periodo apenas variaban. Esto puede estar asociado a que la contracción existente en todas nuestras probetas fue mínima no apareciendo ninguna grieta considerable. Además, el aspecto del antes y el después era prácticamente idéntico, modificando únicamente, de forma visual, el color de las probetas, pasando a un color no tan rojizo como cuando se encontraban húmedas.

El control en desplazamiento para este tipo de probetas fue el siguiente:

- Rampa 1: 3 mm/min hasta 2 mm
- Rampa 2: 2 mm/min hasta 10 mm
- Rampa 3: 4 mm/min hasta 15 mm

Se continuó el mismo criterio escogido para las probetas cilíndricas, aunque al ser estas probetas más esbeltas, con una altura próxima al doble de las anteriores, se aumentó tanto el desplazamiento del pistón en todas las rampas como la velocidad de ejecución de la rampa 2. La duración de los ensayos se encuentra entre dos y tres minutos.

Se muestra a continuación los valores de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad obtenido con el mismo procedimiento que en las probetas cilíndricas, resultando destacable de nuevo la dispersión de los resultados con respecto a esta última propiedad del material:

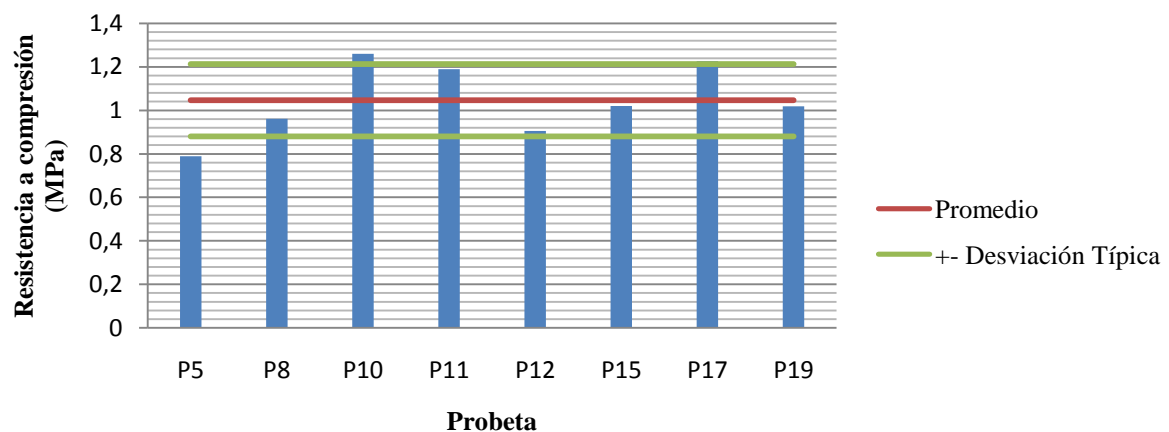


Figura 4.33. Resistencia a compresión (f_{ck}) simple de probetas prismáticas

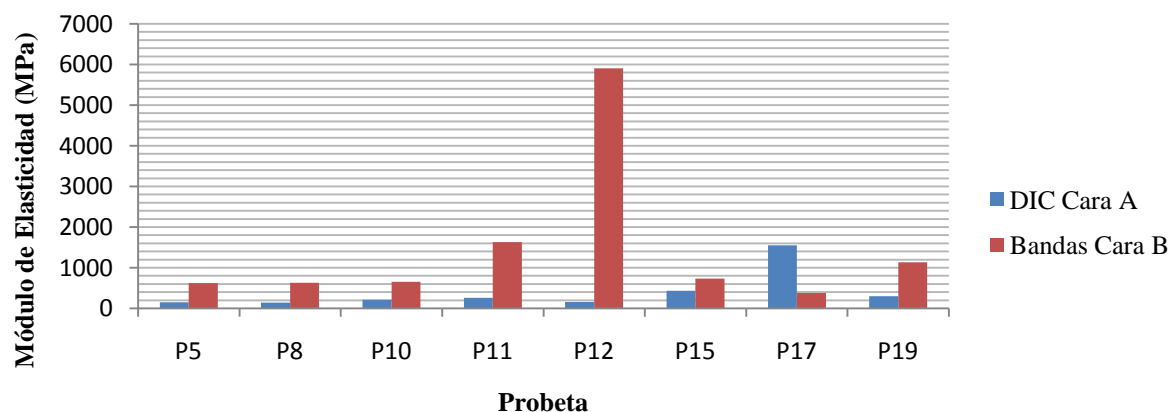


Figura 4.34. Modulo de elasticidad (E) de probetas prismáticas según cara y método de medida

Probeta	f_{ck}	E DIC Cara A	E banda Cara B
P5	0,78856365	150,987233	618,773295
P8	0,96080585	140,18629	631,35533
P10	1,2605538	215,982526	651,067874
P11	1,1900052	262,856042	1631,07745
P12	0,90594007	155,550644	5904,44886
P15	1,02081234	432,012406	731,35042
P17	1,2260848	1551,3658	374,562304
P19	1,01886393	297,263667	1136,34768

Tabla 4.6. Valores resistencia a compresión(f_{ck}) y módulo de elasticidad(E) según método de medida: bandas extensométricas y DIC en probetas prismáticas

4.2.2.1 Curvas tensión-deformación según bandas extensométricas

Este subapartado muestra los resultados obtenidos de las bandas extensométricas colocadas en la cara B de las probetas prismáticas. Se crea un conjunto de gráficas algo engorroso ya que, en general, la banda comienza a medir hasta que se despegga o rompe la zona donde se encuentra pegada, esto provoca que se traccionen ya que se produce una relajación de dicho instrumento de medida. Para mejorar de forma visual y poder obtener conclusiones más claras de los resultados se omitirá esa parte "relajada" que mide la banda a partir del valor máximo de la tensión de cada probeta.

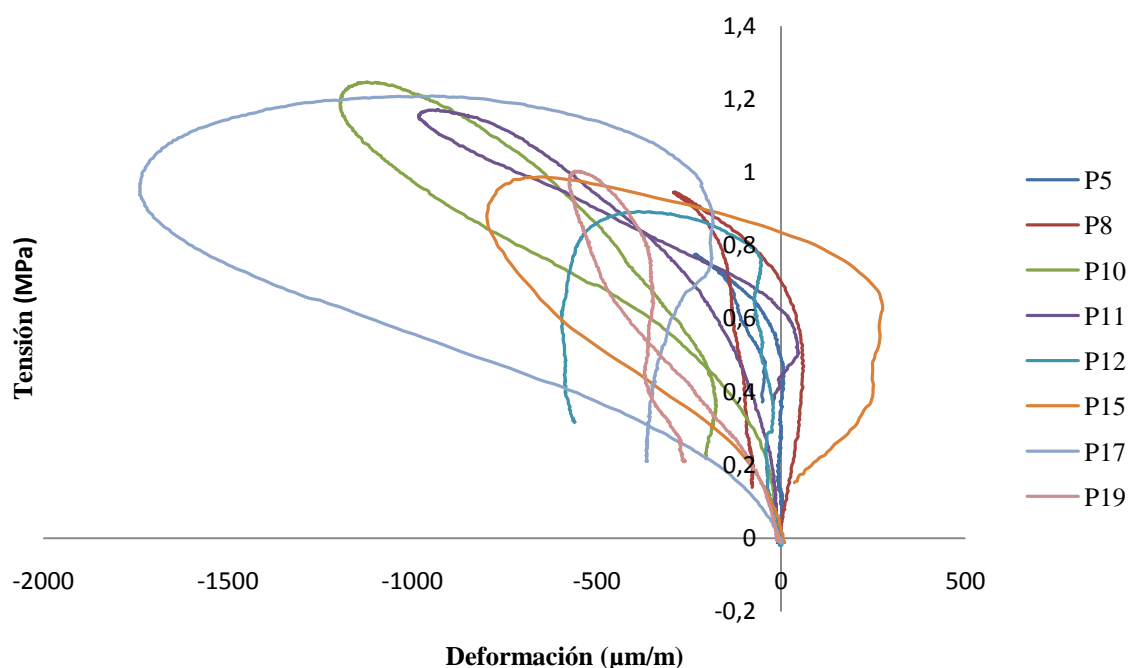


Figura 4.35. Curvas tensión-deformación según bandas extensométricas de probetas prismáticas

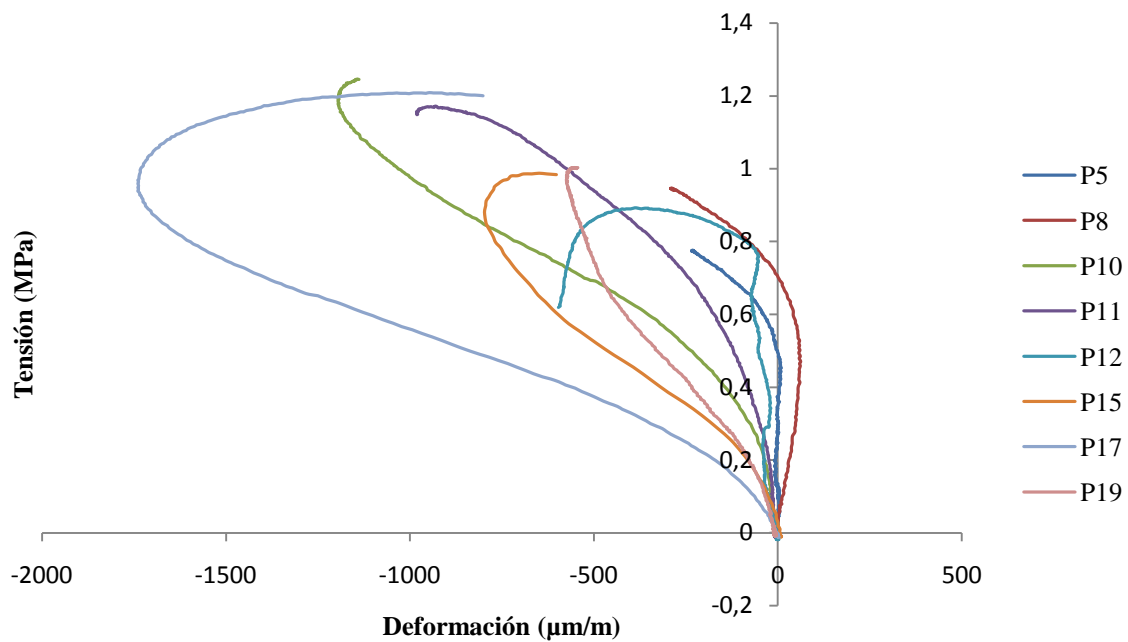


Figura 4.36. Curvas modificadas tensión-deformación según bandas extensométricas de probetas prismáticas

La mayoría de las probetas presentan comportamientos semejantes, creando una tendencia similar en 5 de 8 probetas ensayadas como son P10, P11, P15, P17 y P19. Las deformaciones comienzan a medirse desde el inicio exceptuando la probeta P5 que muestra deformaciones una vez llegado a 0,5 MPa.

Aparecen dos curvas con comportamientos peculiares, P8 y P12. En primer lugar la probeta P8 ofrece deformaciones positivas desde el inicio hasta llegar a aproximadamente 0,6 MPa. A partir de este punto comienza a producirse una compresión de la muestra. Como en más de una ocasión se ha comentado a lo largo de este trabajo, resultaría necesario conocer el movimiento o disposición de los áridos (grava y arena) en el interior de la probeta para fundamentar este tipo de comportamientos.

La máxima deformación está asociada a la probeta P12. Esta se caracteriza por mostrar deformaciones muy reducidas hasta prácticamente llegar a la tensión máxima. A partir de este valor comienza una descarga de tensión más brusca que en el resto de las probetas.

4.2.2.2 Curvas tensión - deformación según DIC en cara A

En este apartado se expondrán algunas de las gráficas realizadas a partir de los datos obtenidos por la técnica de medida de correlación de imágenes (DIC). Como estamos ante 8 probetas prismáticas, se ha decidido introducir todas las gráficas restantes en un anexo al igual que con las probetas cilíndricas. Se han seleccionado las probetas P8, P10, P12 y P17. Cabe señalar que, la probeta P17 se fabricó con un control en fuerza además, el puente que fija el cilindro móvil de la máquina de ensayos no se bloqueó en el momento de la fabricación, generando una incertidumbre con respecto a los resultados asociados. Se presentan en primer lugar las curvas correspondientes a las **líneas longitudinales**:

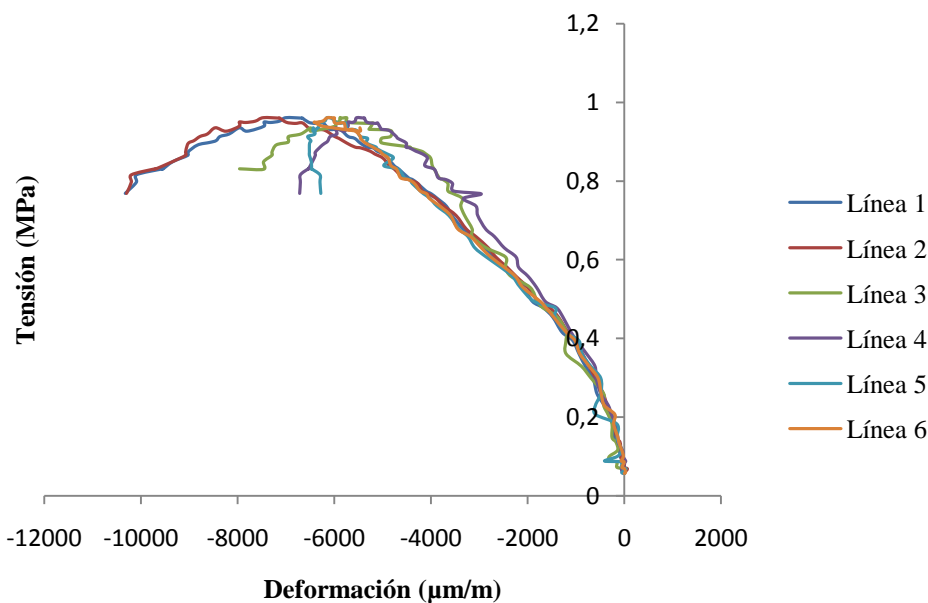


Figura 4.37. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P8

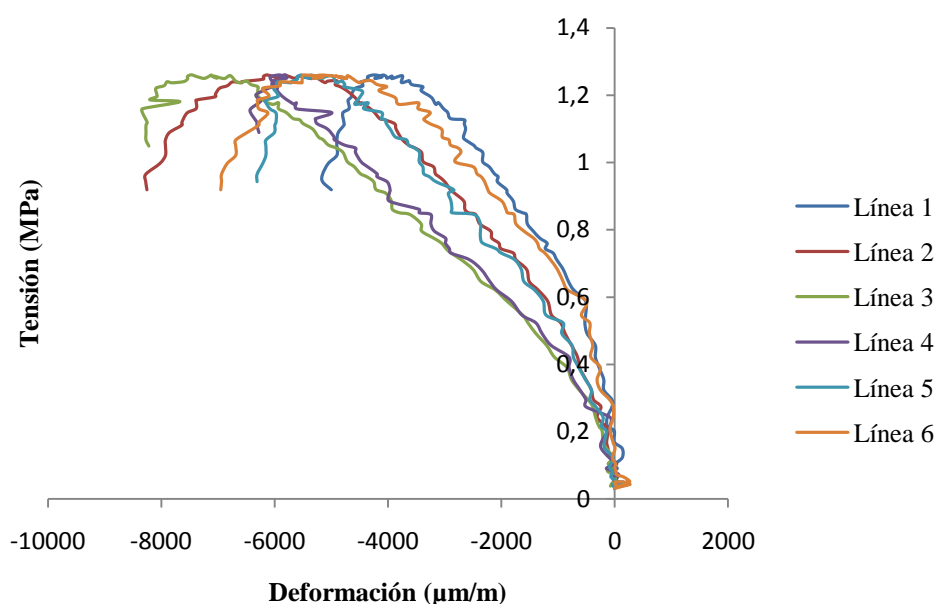


Figura 4.38. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P10

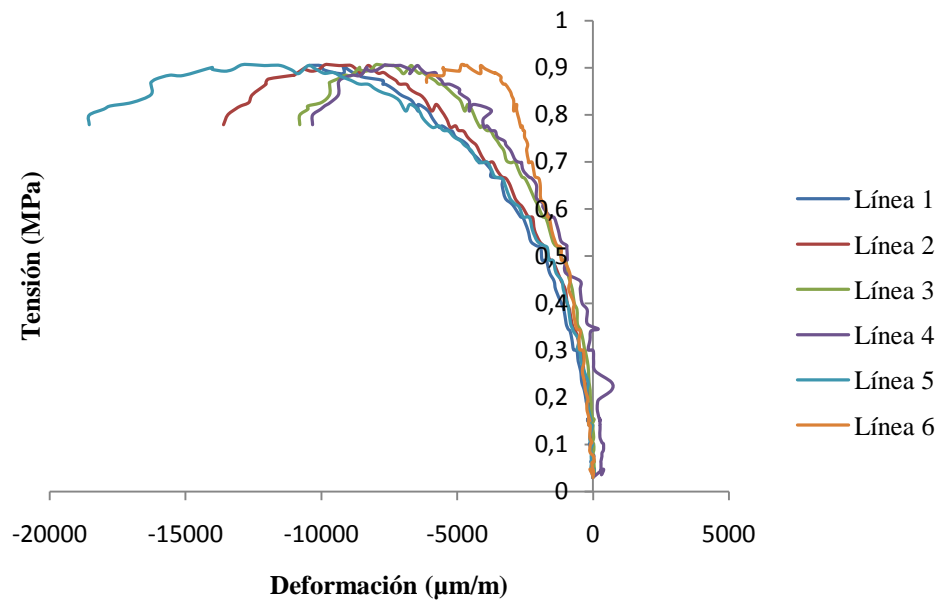


Figura 4.39. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas longitudinales de P12

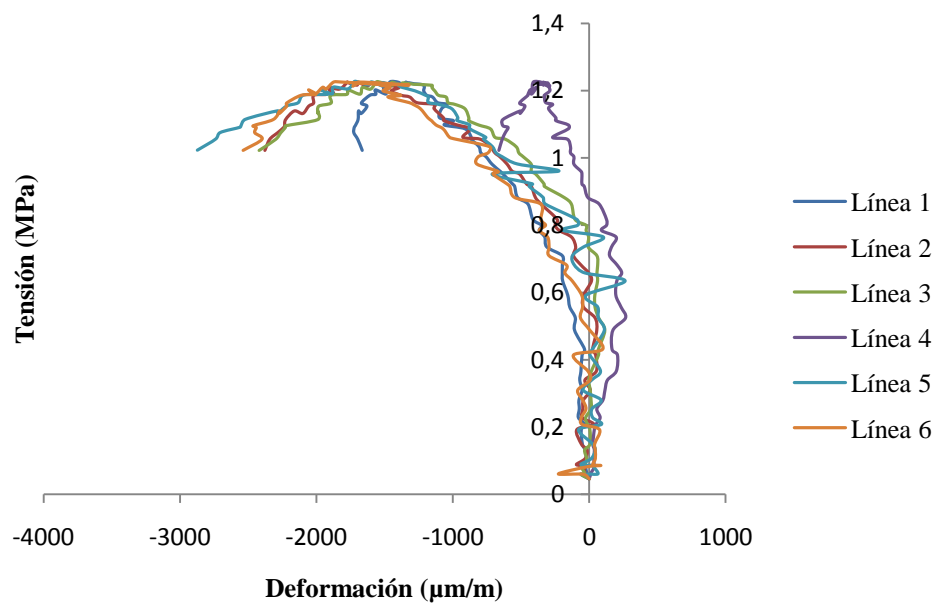


Figura 4.40. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas longitudinales de P17

En general, teniendo en cuenta todas las curvas existentes y por ende, el comportamiento de las probetas, poseen una misma tendencia ofreciendo resultados similares entre ellas. Las gráficas, a pesar de la existencia de ruido, comienzan con un tramo prácticamente lineal aunque con una pendiente variable entre los distintos casos. A medida que se va acercando al valor máximo de la tensión, dicha pendiente se va atenuando. En el momento de la rotura se generan deformaciones incluso tras la reducción de tensiones. Este tramo es el asociado a la descarga.

En todos los casos, los valores de deformación máximos se encuentran en el centro de la probeta independientemente de la longitud de línea. Por el contrario, las menores deformaciones ofrecidas suceden en 5 de 8 casos en el lado derecho, correspondiendo a la línea L4.

No existen, por lo regular, comportamientos distintos en una misma línea vertical como sí ocurría en las probetas cilíndricas, resultando incluso más sencillo de apreciar la relación entre líneas. La probeta P10 muestra un ejemplo de este hecho. Presenta tres familias distintas de curvas, donde la línea 1 se asemeja a la línea 6, la línea 2 con la línea 5 y línea 3 con la línea 4. Aunque entre ellos ofrecen distintas deformaciones finales, las pendientes iniciales son prácticamente semejantes dos a dos.

Un caso particular es la probeta P17, que fue controlada en fuerza durante su fabricación aplicando 42 kN y además el puente que fija el eje móvil de la máquina no fue bloqueado. Todo lo anterior, unido a la disposición heterogénea y singular de los áridos en el interior de la probeta, se ve reflejado en las curvas obtenidas, ofreciendo unas deformaciones negativas de menos de la mitad que las asociadas al resto. Los valores máximos no alcanzan 3000 $\mu\text{m/m}$ mientras que el mínimo valor de deformaciones asociado al resto de probetas corresponde a 4500 $\mu\text{m/m}$. Es de las probetas que mayor resistencia a compresión ofrece, anterior a la P10.

Las curvas seleccionadas asociadas a las **líneas transversales** de las probetas prismáticas son:

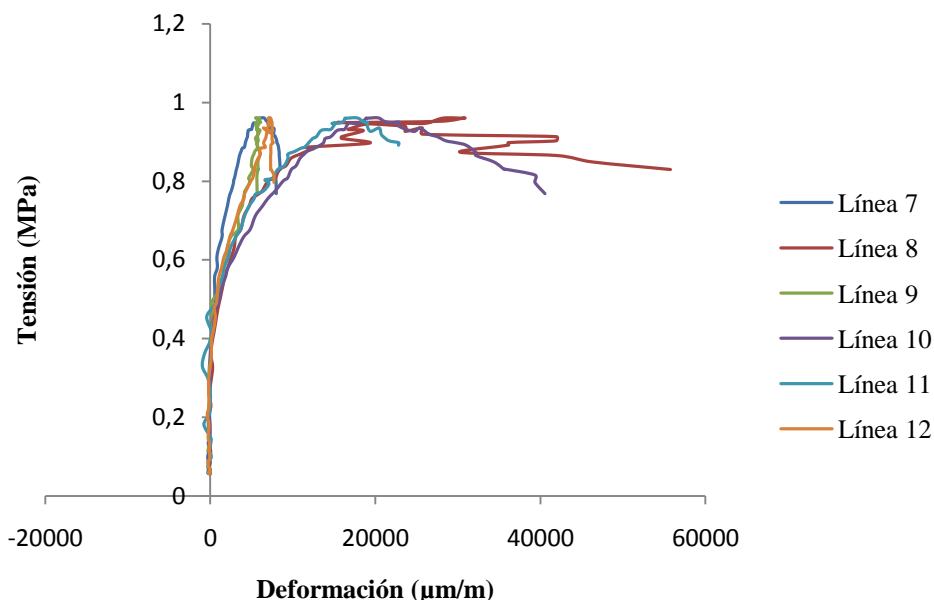


Figura 4.41. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas transversales de P8

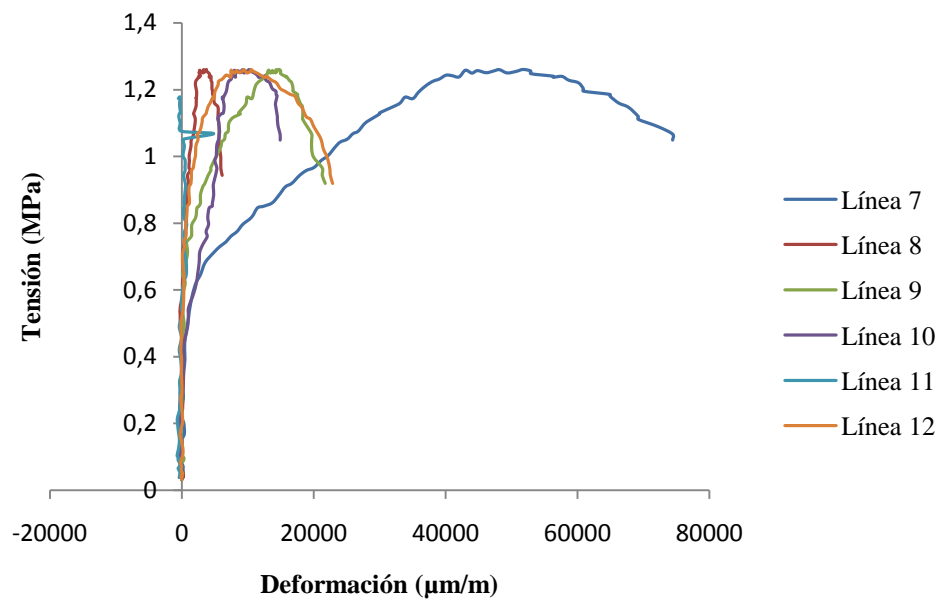


Figura 4.42. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas transversales de P10

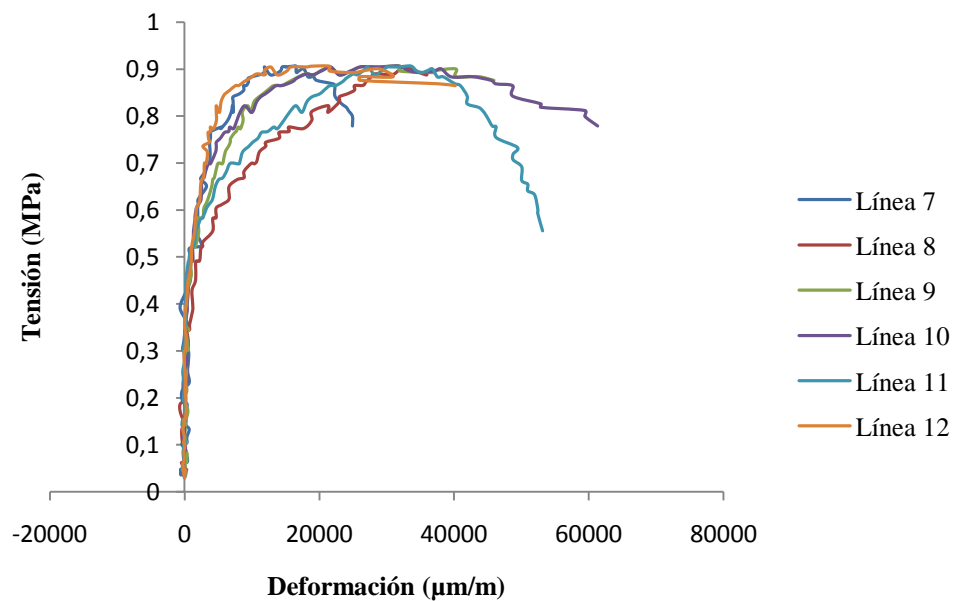


Figura 4.43. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas transversales de P12

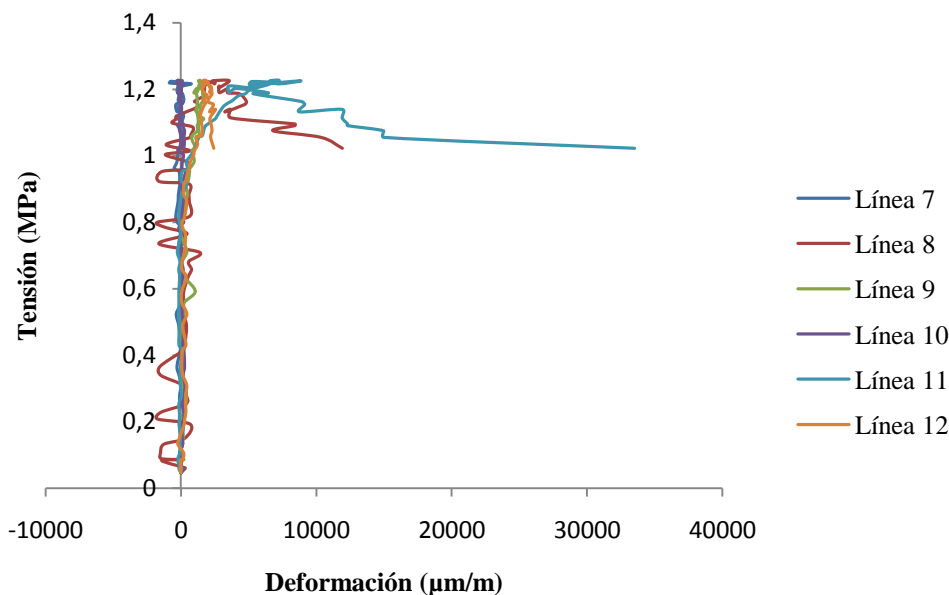


Figura 4.44. Curvas tensión- deformación según DIC de líneas transversales de P17

Al igual que en las probetas cilíndricas, la obtención de las curvas a partir del software informático resultó ser más dificultosa que con respecto a las líneas longitudinales. Esta orientación vertical de las líneas, además de ser de menor longitud que las comentadas anteriormente, coincidieron con muchos espacios no captados por las cámaras provocando curvas con ruido excesivo o con resultados no válidos. Además Miden deformaciones positivas, es decir, la tracción que se produce de forma perpendicular a la aplicación de la carga. Esta deformación no comienza a ser notable hasta llegar a aproximadamente 0,4 MPa.

Para esta disposición de líneas no resulta evidente el asociar las mayores deformaciones a la zona central ya que solo se muestra en el 50% de las probetas. El 50% restante está asociado a una deformación máxima en el lado derecho. Sin embargo, las menores deformaciones sí se encuentran relacionadas con los extremos y nunca con el espacio central medido por las líneas 8 y 11.

Estas líneas transversales muestran valores de deformaciones mucho mayores a las deformaciones longitudinales. Alcanzan un máximo de 100000 $\mu\text{m/m}$ en comparación a los 20000 $\mu\text{m/m}$ asociados al máximo ofrecido por las líneas longitudinales

La existencia de tres familias de curvas se vuelve a repetir pero no de forma tan perceptible como en el caso de la disposición vertical, apareciendo una dispersión entre curvas. Pese a no ser un hecho tan apreciable, la probeta P12 muestra este suceso, ofreciendo pendientes similares dos a dos por zonas.

De nuevo, P17 muestra las menores deformaciones del conjunto de probetas asociado al procedimiento de fabricación con un control en carga.

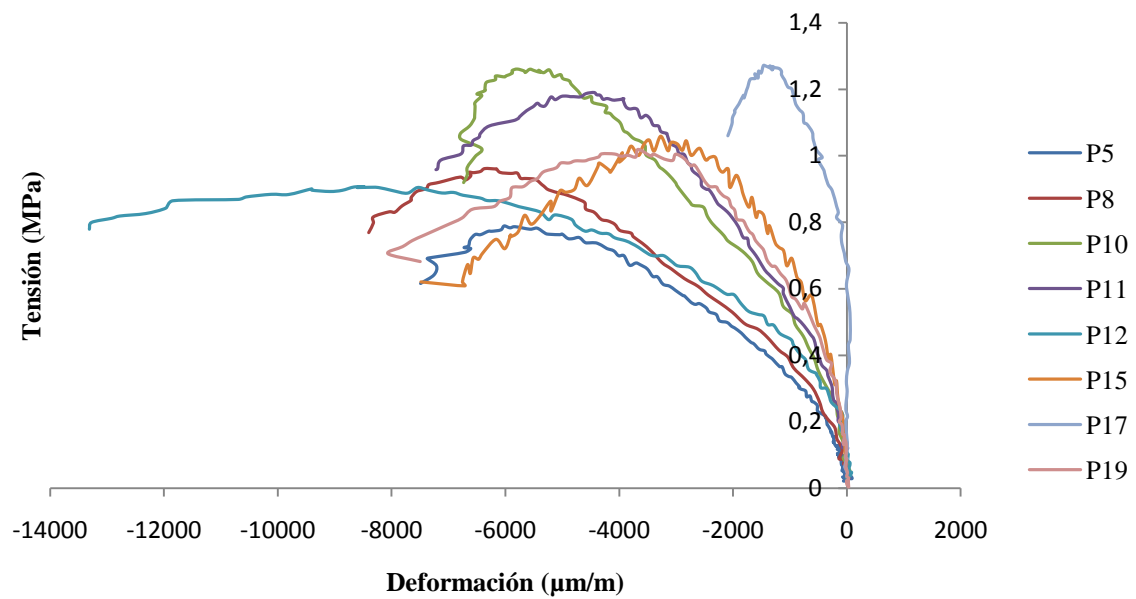


Figura 4.45. Curvas tension-deformación promedio de líneas longitudinales de probetas prismáticas

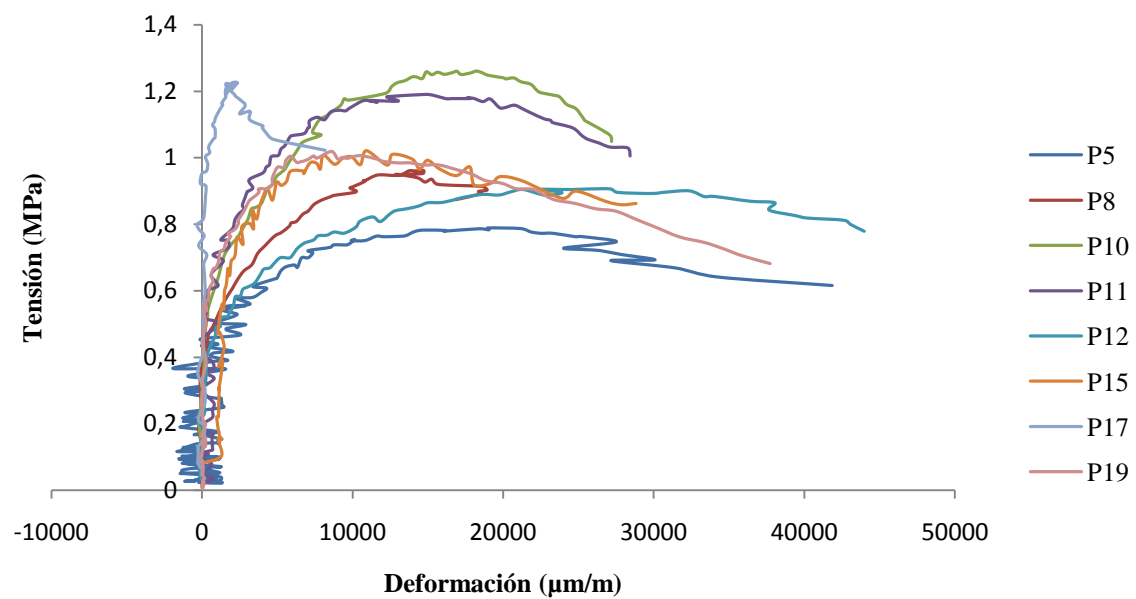


Figura 4.46. Curvas tension-deformación promedio de líneas transversales de probetas prismáticas

4.2.2.3 Comparación curvas σ - ϵ obtenidas por bandas extensométricas y DIC

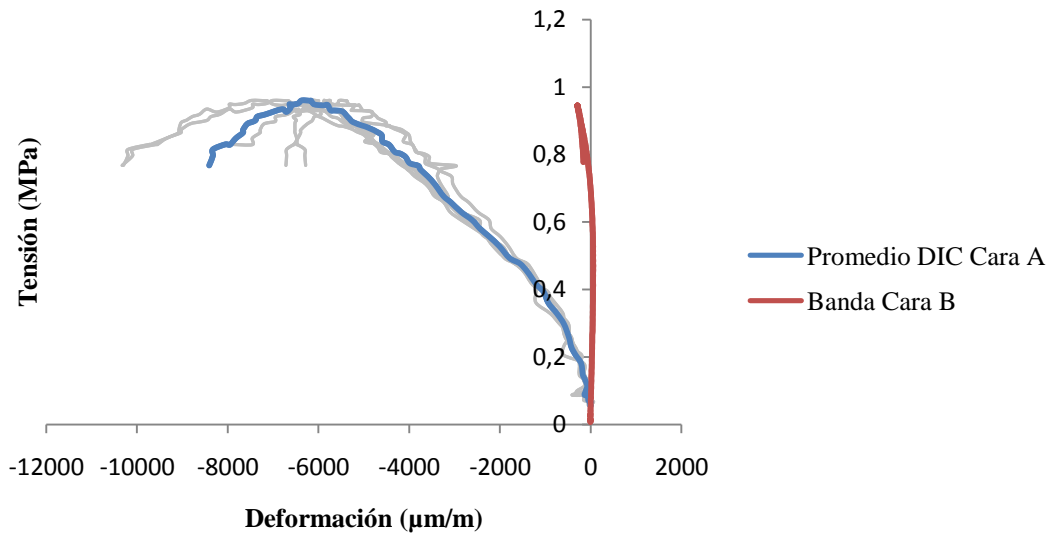


Figura 4.47. Curvas tensión-deformación de probeta P8 según bandas extensométricas frente a DIC

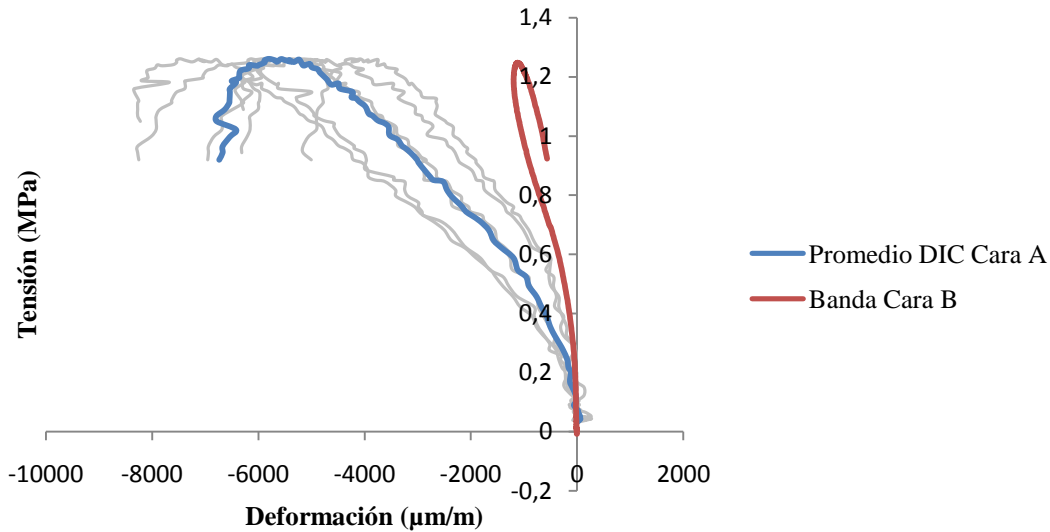


Figura 4.48. Curvas tensión-deformación de probeta P10 según Bandas extensométricas frente DIC

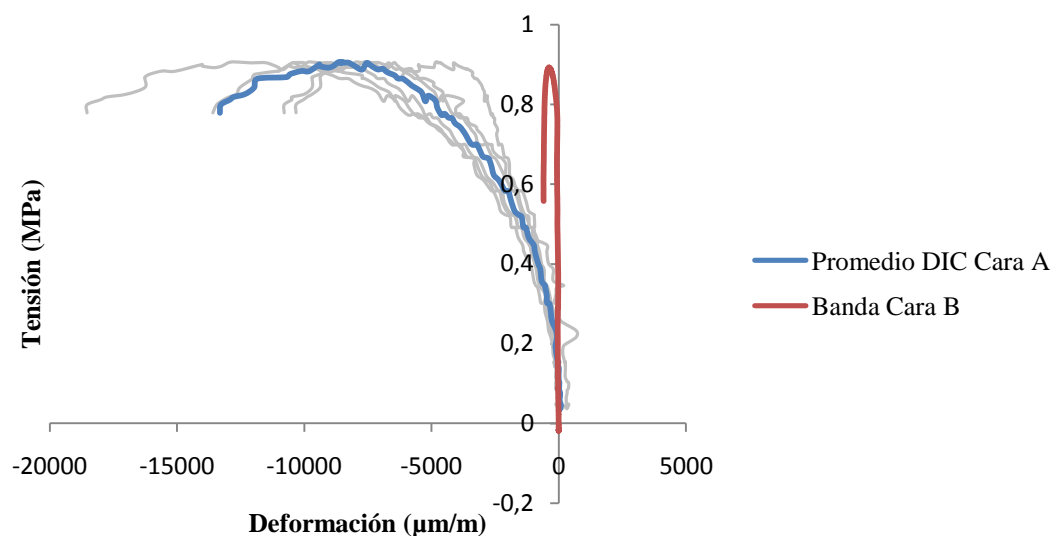


Figura 4.49. Curvas tensión-deformación de probeta P12 según bandas extensométricas frente a DIC

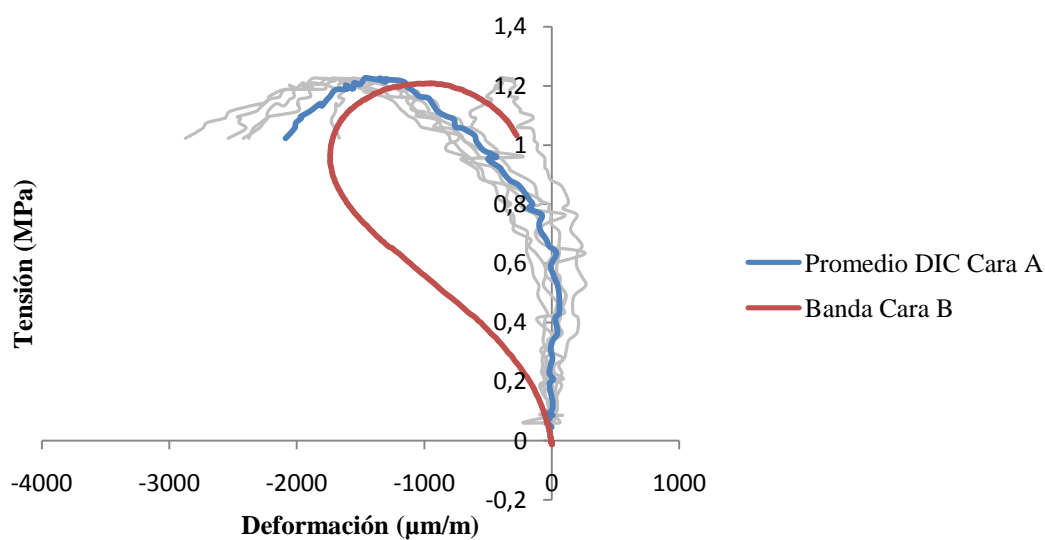


Figura 4.50. Curvas tensión-deformación de probeta P17 según bandas extensométricas frente a DIC

El aspecto más llamativo entre curvas es la diferencia existente entre comportamientos ofrecidos al estar midiendo caras distintas en una misma probeta. A diferencia de las cilíndricas, cada técnica recoge un rango de medida de deformaciones distinto, las bandas extensométricas no superan en ninguno de los casos 2000 $\mu\text{m/m}$ mientras que en el caso de la técnica de medida DIC los valores de deformación alcanzan incluso los 20000 $\mu\text{m/m}$, limitando la posibilidad de relacionar ambas caras.

La probeta P17 ofrece, de nuevo, un comportamiento singular al resto, compartiendo rango de magnitud ambos métodos de medida.

4.3 Ensayo de ultrasonidos

Las pruebas con ultrasonidos están basadas en un ensayo no destructivo realizado a dos tipos de probetas fabricadas en el laboratorio: probetas prismáticas y cilíndricas, a partir del cual se obtiene el tiempo existente entre que una onda emitida por un palpador en contacto con la superficie de la probeta atraviesa esta y llega al siguiente palpador que trabaja como receptor de la señal emitida. Este tiempo, llamado **tiempo de propagación** se obtiene como medida directa a través del aparato de ultrasonidos, CSI Concrete tester CCT-4, disponible en el laboratorio, que muestra el tiempo en microsegundos(μs) que tarda en viajar dicha onda emitida desde el emisor hasta el receptor



Figura 4.51. Componentes necesarios para ensayo de ultrasonidos

Para la realización del ensayo se coloca un emisor y el correspondiente receptor en caras opuestas de la probeta en la misma línea transversal, siendo necesario conocer la distancia exacta entre ambos palpadores tal y como se muestra en el procedimiento seguido de la norma **UNE-EN 12504-4(AENOR 2004): Ensayos de hormigón en estructuras**. La velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas dependerá del módulo de elasticidad (E), módulo de Poisson (ν) y densidad del material (ρ). Para obtener mejores resultados se le aplica a dichos palpadores algún material que mejore el contacto con la pieza. En general, para los ensayos de ultrasonidos como los realizados al hormigón, se usa un gel específico, sin embargo, dicho producto era absorbido por la pieza de tapia lo que dificultaba la misión de dicho gel. Por consiguiente, para nuestro caso, se utilizó un material más denso similar a la grasa haciendo pruebas con ambos materiales (gel y grasa) en una pieza de acero previamente calibrada para comprobar la validez de los resultados obtenidos.

De forma previsor, se realizaron pruebas a unas probetas de adobe ya fabricadas para comprobar el buen funcionamiento de dicho aparato de ultrasonidos, ejecutando el mismo procedimiento a realizar en las probetas de tapia. Gracias a la ejecución de estas pruebas se pudo corroborar que a medida que la distancia entre los palpadores aumentaba, la capacidad de obtener los resultados desmejoraban lo que se planteó la validez de los resultados en las probetas de tapia. No obstante, tal y como ofrece en las siguientes tablas, los resultados obtenidos son coherentes, aportando incluso mejores conclusiones que en las pruebas realizadas a los bloques de adobe.

Para definir los valores y debido a que nos encontramos ante un material tan heterogéneo como la tapia se realizaron tres medidas tanto en la **dirección de compactación(DC)** como en la **dirección transversal(DT)** como se ofrece en el siguiente esquema:

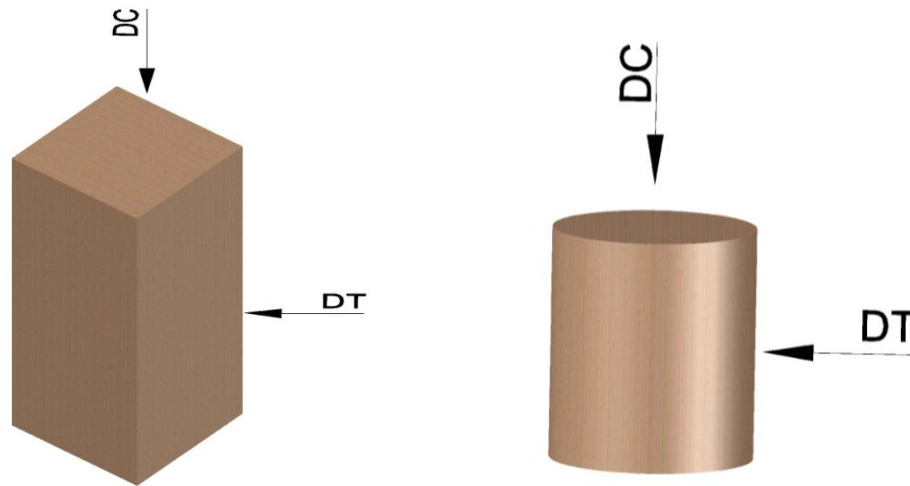


Figura 4.52. Direcciones de medición de velocidades de ultrasonidos

Probetas	DC	DT
C1	1743.60481	1951.984444
C2	1712.67802	1825.677804
C3	1815.14783	1884.022327
C4	1840.00746	1901.21356
C5	1780.67094	1928.840622
C6	1782.36099	1820.082006
C7	1854.20236	1860.538521
C8	1845.51223	1977.23932
C9	1842.36355	1928.536521
C10	1847.35734	1911.613621
C11	1761.9014	1895.659074
Promedio	1802.34609	1898.673438
Desviación típica (%)	2.70437121	2.589516705

Tabla 4.7. Velocidad de ultrasonidos de probetas cilíndricas expresadas en m/s

Probetas	DC	DT
P1	1588.00802	1543.984894
P2	1482.32805	1740.143804
P3	1480.72691	1778.722686
P4	1489.76535	1831.111705
P5	1477.19516	1725.179354
P6	891.327295	1835.680792
P7	1623.10273	1795.989681
P8	1524.68644	1765.816158
P9	1572.03033	1785.754407
P10	1690.80092	1990.636499
P11	1636.73576	1867.608542
P12	1579.29449	1847.360272
P13	1564.01849	1876.023774
P14	1577.37637	1904.850238
P15	1576.87713	1854.122041
P16	1617.14224	1894.688476
P17	1666.20658	1813.368462
P18	1546.31094	1768.171185
P19	1675.76374	1793.240786
P20	1522.05974	1760.639295
Promedio	1539.08783	1808.654653
Desviación típica (%)	10.7714199	4.943946538

Tabla 4.8. Velocidad de ultrasonidos de probetas prismáticas expresadas en m/s

Los resultados ofrecidos en las tablas 4.7 y 4.8 pertenecen al promedio de las tres medidas recogidas en el laboratorio. En el caso de la dirección transversal, las medidas se tomaron comenzando por el centro, la siguiente en la zona inferior de la probeta y la última en la zona superior. Estas medidas se decidieron tomar a las cuatro semanas de curado de ambas geometrías de probetas para asegurar que los resultados registrados en ese instante coincidirían con aquellos que se obtendrían en el momento del ensayo.

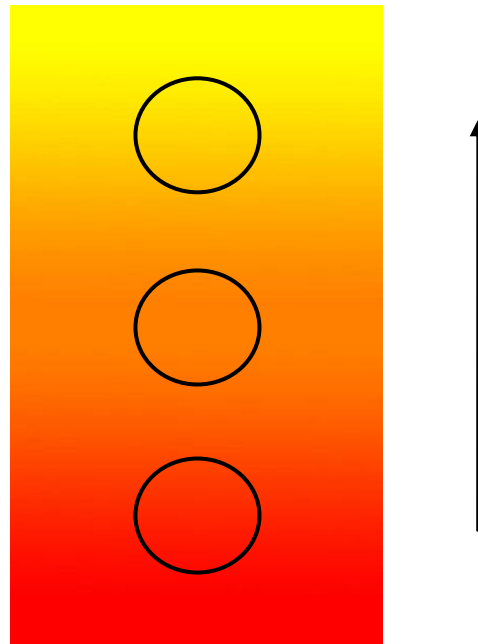


Figura 4.53. Gradiente de velocidades de ultrasonidos, de mayor a menor (según flecha)

En las **probetas prismáticas**, en el 85% de los casos, el mayor valor de las mediciones tomadas del tiempo de propagación se encuentra en la parte superior de la probeta. Al ser velocidad y tiempo inversamente proporcionales, implica que en esta zona la velocidad de propagación de las ondas de ultrasonidos es menor. Esto se encuentra asociado a que esa zona es menos densa y por ello a la onda le resulta más complicado propagarse de un extremo al otro coaccionada por los huecos existentes entre áridos. Se sospecha así un gradiente de compactación diferenciando ambas zonas. Por ello en la parte inferior, el tiempo de propagación resultado del mayor número de probetas (el 85% del total) está asociado a una velocidad de propagación de las ondas mayor.

En el caso de las **probetas cilíndricas**, las conclusiones anteriores no son tan claras ya que existe una menor desviación entre los resultados obtenidos manifestándose valores muy similares entre ellos. Sin embargo, existe una tendencia de las mediciones en la parte superior donde el valor del tiempo de propagación de las ondas es mayor en el 92% de los casos estudiados. Como estas probetas poseen una menor altura, los resultados medidos en el centro y en la zona superior de la probeta son muy similares entre ellos, dejando ver en el 60% de los casos estudiados que en la zona inferior el tiempo de propagación es menor. Estos resultados hacen intuir que el factor dimensión también se encuentra relacionado con este fenómeno ya que, mientras que en las probetas prismáticas la altura es prácticamente el doble de la anchura, en las probetas cilíndricas sólo se diferencian en 13 mm ambas dimensiones.

Con respecto a las medidas en la dirección de compactación (DC), en todas las probetas se puede apreciar que las velocidades de ultrasonidos son menores que en la dirección transversal. Estas mediciones tomadas en esa dirección resultaron más costosas de obtener. Esto puede estar asociado a que, al ser la dimensión mayor, exista una mayor probabilidad de que aparezcan defectos internos (microgrietas, disposición de áridos...) en la probeta que pueda afectar a la toma de medidas. Se ve reflejado en un aumento de la desviación típica, implicando una mayor variación de los resultados con respecto al promedio.

4.4 Correlación de resistencia a la compresión con otros parámetros

Resulta conveniente, al haber llevado a cabo un control de distintos parámetros durante todo el proceso, analizar la posible influencia de la resistencia a compresión obtenida junto con el resto de variables. Para ello se han generado nube de puntos que relacionan energía de compactación, humedad, tanto inicial (medida en el momento de la fabricación) como final (medida tras ultimar los ensayos), y velocidad de ultrasonidos en ambas direcciones con los valores de resistencia a compresión.

Para las **probetas prismáticas** se obtiene lo siguiente:

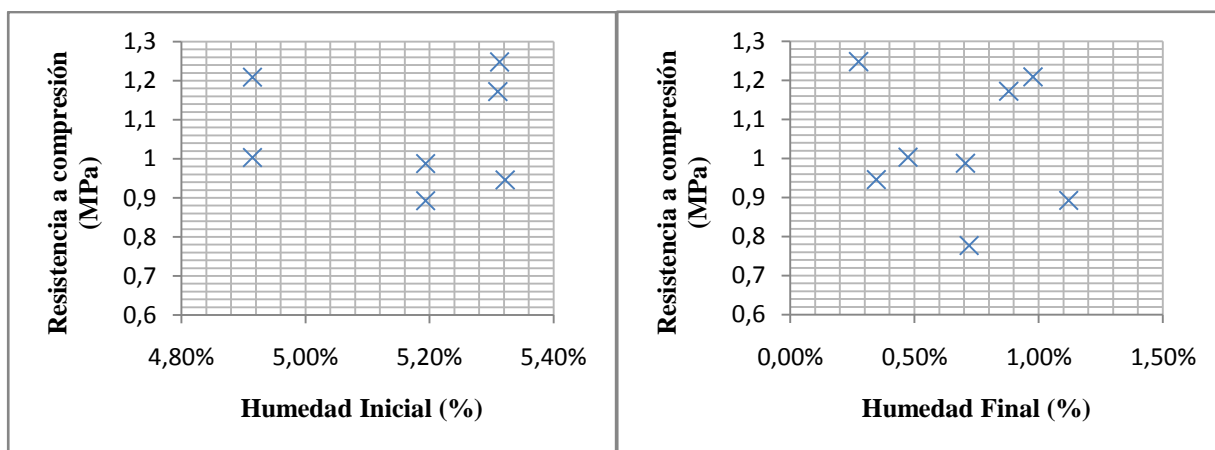


Figura 4.54. Correlaciones resistencia a compresión frente humedad inicial y final en probetas prismáticas

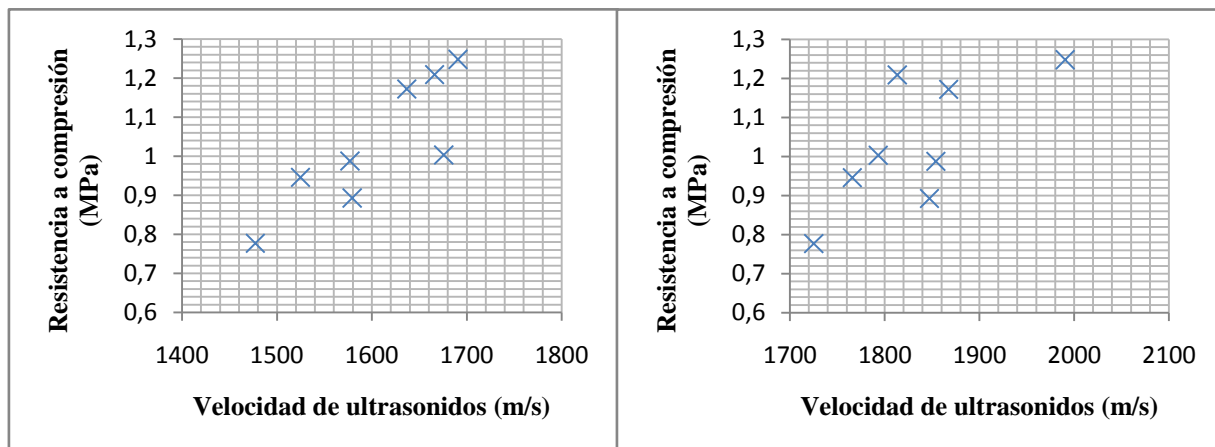


Figura 4.55. Correlaciones resistencia a compresión frente velocidad ultrasonidos dirección de compactación (izquierda) y dirección transversal (derecha) en probetas prismáticas

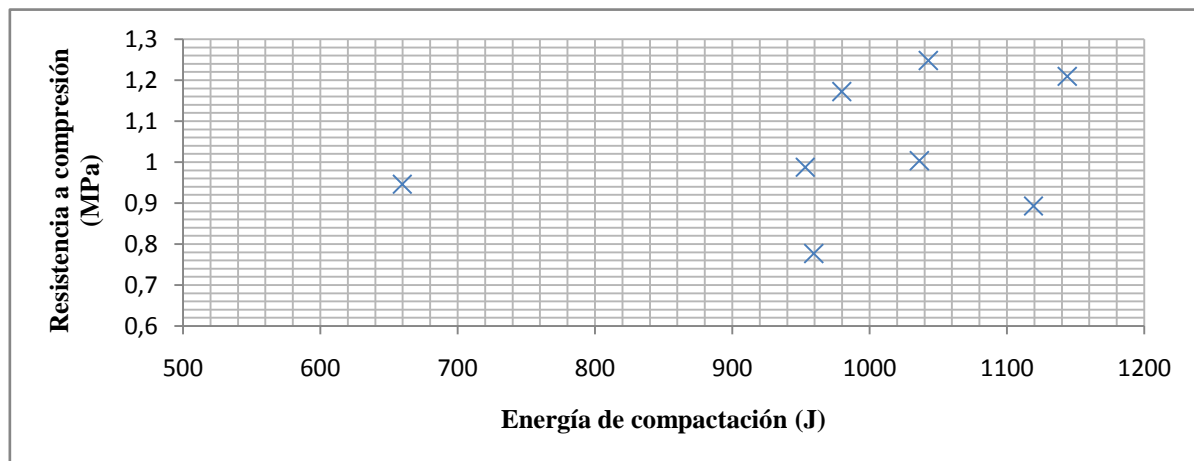


Figura 4.56. Correlación resistencia a compresión frente energía de compactación en probetas prismáticas

Dentro de estos gráficos, la influencia más apreciable se da en la figura 4.55, donde puede apreciarse una tendencia lineal creciente entre la nube de puntos existiendo relacionando la velocidad de ultrasonidos con la resistencia a compresión. La probeta con mayor resistencia a compresión ofrece a su vez una mayor velocidad de ultrasonidos y la menos resistente posee la menor velocidad. Esto se muestra tanto en las mediciones realizadas en la dirección de compactación como en la dirección transversal.

El resto de parámetros no muestran nada significativo a simple vista. Para poder relacionar los parámetros sería necesario un análisis multivariable que relacionen distintas variables a la vez.

Los parámetros obtenidos de las **probetas cilíndricas** se representan a continuación. La humedad inicial no ha sido considerada porque todas las probetas ensayadas, excepto una, se realizaron con la misma mezcla tierra y agua, lo que impide obtener conclusiones de esa gráfica.

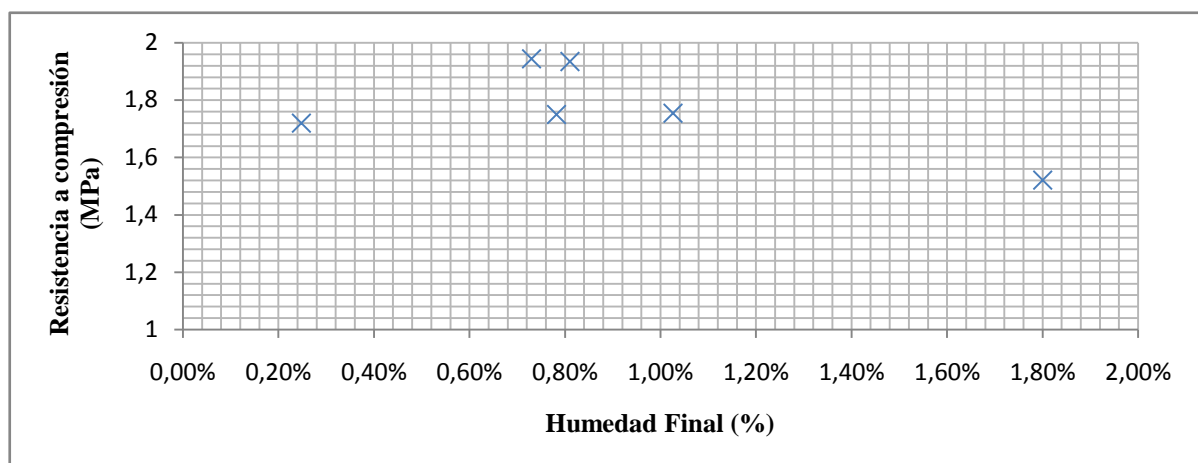


Figura 4.57. Correlación resistencia a compresión frente humedad final en probetas cilíndricas

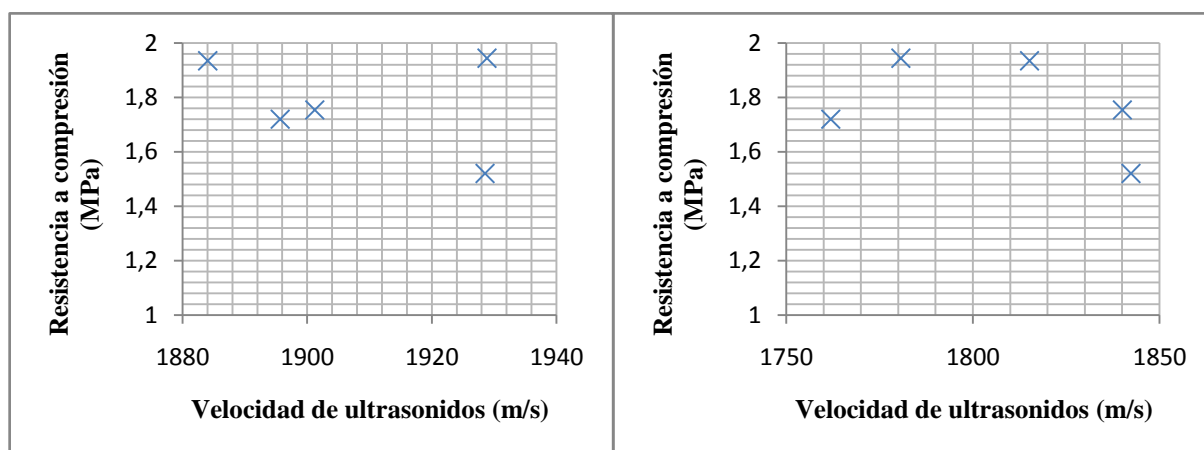


Figura 4.58. Correlaciones resistencia a compresión frente velocidad ultrasonidos dirección de compactación(izquierda) y dirección transversal(derecha) en probetas cilíndricas

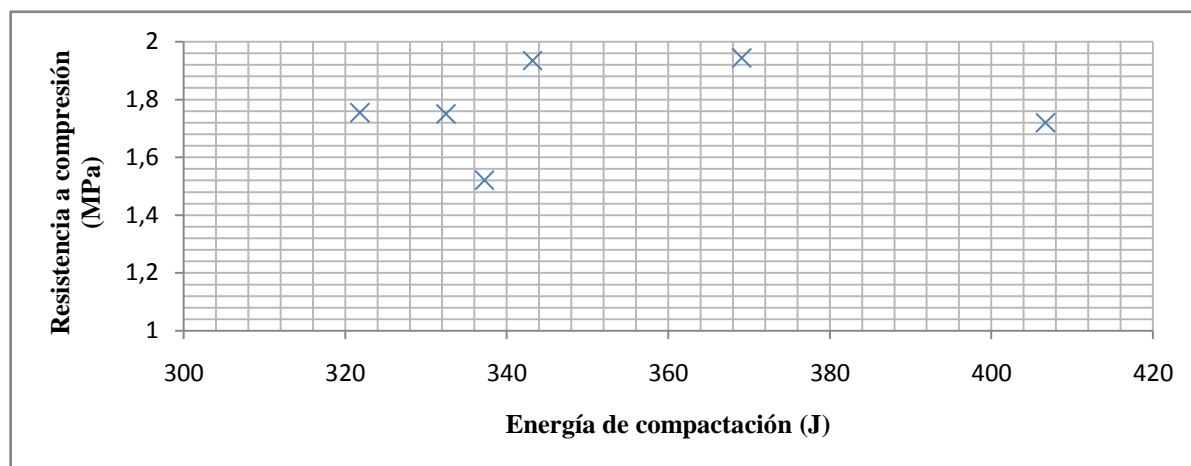


Figura 4.59. Correlación resistencia a compresión frente energía de compactación en probetas cilíndricas

En el caso de las probetas cilíndricas, resulta más complicado obtener conclusiones con las gráficas que se muestran. Esto se encuentra relacionado a que el número de probetas ensayadas son reducidas, lo que se asocia a la obtención de pocos puntos. Resultaría conveniente haber realizado más ensayos para la obtención de conclusiones válidas.

En comparación con las probetas prismáticas, la tendencia creciente asociada a la velocidad de ultrasonidos no resulta apreciable en la figura 4.58. Se deduce, que este hecho puede encontrarse asociado a la esbeltez de las probetas prismáticas siendo más apreciable el gradiente de compactación en ellas.

5 CONCLUSIONES

Cerrando el presente trabajo, resulta conveniente exponer las conclusiones más relevantes dentro de la línea de investigación iniciada y aquí descrita.

Cabe subrayar que los resultados muestran una destacada disparidad entre ellos recalcando que la heterogeneidad de nuestro material provoca este hecho. A pesar de llevar un protocolo ordenado y minucioso a la hora de fabricar las probetas, la distribución de los materiales en el interior es incierto. La colocación de los distintos áridos de la probeta además de su estado final, es decir, si se ha dañado o desmoronado parte de ella, generará unos comportamientos u otros.

Las probetas fabricadas mostraban un aspecto de fragilidad a la hora de manipularlas. Desde el primer momento se intentó no trasladarlas en exceso, algo inevitable por la colocación de bandas extensométricas y el pintado posterior, ya que algunos áridos se iban despegando de las caras de las probetas, sobretodo en la zona de la base. Sin embargo, el método de construcción con tapia tiene una ventaja destacable con respecto al adobe o BTC y es que, en todo momento, se está trabajando con la mezcla en crudo, sin la necesidad de crear ladrillos para la posterior construcción de edificios o viviendas. Esto permite que parámetros, como la cantidad de agua, puedan variarse durante una obra.

Los comportamientos locales provocados por la heterogeneidad se acentúan en las probetas cilíndricas, ofreciendo curvas contradictorias incluso dentro de una misma línea vertical. Este hecho está asociado al tamaño de la probeta resaltando la visibilidad de dichas situaciones en las gráficas. Las probetas prismáticas, donde la esbeltez es superior, no ofrece apenas estos comportamientos presentando curvas similares entre ellas. Tanto en las probetas prismáticas como en las cilíndricas, el haber controlado dos lados distintos y opuestos de la probeta (cara A y cara B) permite demostrar la desigualdad existente en cuanto a comportamientos.

Otro aspecto a tener en cuenta es el número reducido de ensayos realizados. Debido a la escasez de tiempo y el largo recorrido asociado a la fabricación de las probetas, se decidió únicamente elaborar veinte prismáticas y once cilíndricas, ambas destinadas a dos tipos de ensayos distintos. Este aspecto resulta sustancial ya que a medida que aumenta el número de ensayos se puede llegar con más fiabilidad a unas conclusiones válidas. Por tanto, a pesar de que en este trabajo se puedan obtener ciertas tendencias o referencias de las distintas probetas, resultaría conveniente seguir realizando ensayos como los aquí descritos para la obtención de propiedades reales de este material.

Los valores de resistencia a compresión, f_{ck} son mayores en las probetas cilíndricas. El motivo innegable de este suceso es el método de fabricación de dichas probetas, ayudados de unos moldes de acero, logrando unas probetas más compactas y con un aspecto exterior más pulido que en las probetas prismáticas. El molde de madera confeccionado para dichas probetas ofrecía inconvenientes destacables como la aparición de algunas grietas y el deterioro sucesivo de las paredes interiores por la fricción existente entre la tierra y la madera durante la compactación. Dando lugar a una absorción de energía notable por parte del molde.

Desde el comienzo, apareció una incertidumbre relacionada con aplicar la técnica de la correlación digital de imágenes (DIC) a las probetas cilíndricas ya que nunca se había llevado a cabo. Sin embargo, en vista de los resultados obtenidos podemos concluir que la campaña de ensayos realizada ha sido satisfactoria. El haber instrumentado las probetas con bandas extensométricas en el mismo lado que se realizó la medición con las cámaras se considera todo un acierto ya que es posible afirmar que ambos métodos de medida son capaces de evaluar este material.

Es cierto, que tanto en las probetas prismáticas como en las cilíndricas, surgieron complicaciones a la hora de obtener los datos de las líneas transversales pintadas de forma imaginaria, ya que aparecían zonas no captadas por las cámaras provocando curvas con exceso de ruido. Es por ello que resulta conveniente, para próximos ensayos, hacer más hincapié en el proceso de preparación previo de las probetas con el correspondiente pintado y moteado.

Tal y como se puede consultar en la tabla 1.1 todas las actividades relacionadas con este proyecto comenzaron en febrero y finalizaron a principios del mes de julio de 2018.

Este camino, de forma personal, ha resultado toda una aventura, sin dejar de aprender por enseñanzas adquiridas del conocimiento de gran cantidad de personas que se cruzaron en este viaje. Comenzó con la oportunidad de realizar los ensayos previos al material en un laboratorio ajeno, en la Escuela Técnica Superior de Arquitectura, brindando la oportunidad de utilizar elementos, como los utensilios del ensayo Próctor Normal que no se disponían en el laboratorio en el que posteriormente continuó nuestro trabajo: el laboratorio de Estructuras de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería en Sevilla donde se trabajó la tierra fabricando las probetas además de realizar los distintos ensayos. Durante este recorrido, nos invitaron a disfrutar de una jornada en el lugar donde se localizaba la construcción con tapia cuyo material utilizado ha sido el protagonista de este trabajo, conociendo a personas con los mismos intereses, compartiendo experiencias y conocimientos que se reflejan en este trabajo.

ANEXO

El siguiente anexo presenta una recopilación de todas las curvas tensión(σ)-deformación(ϵ) de cada línea, tanto longitudinal como transversal, obtenidas de la técnica de medida relacionada a la Correlación Digital de Imágenes (DIC) para una posible consulta. En primer lugar se representan las gráficas asociadas a las probetas cilíndricas y seguidamente, las asociadas a las probetas prismáticas. Las curvas más relevantes se encuentran expuestas y analizadas en el apartado 4.2: *Resultados de los ensayos*.

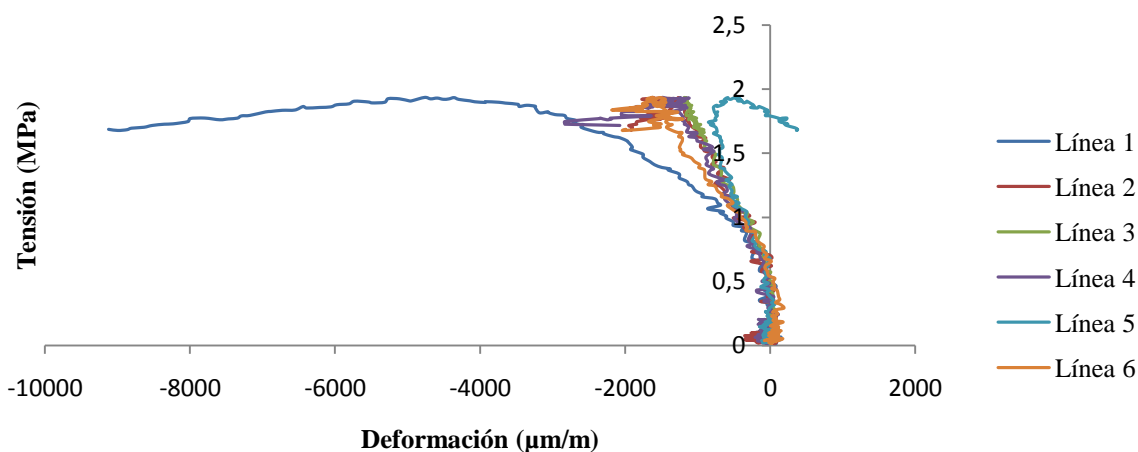


Figura 6.1. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C3

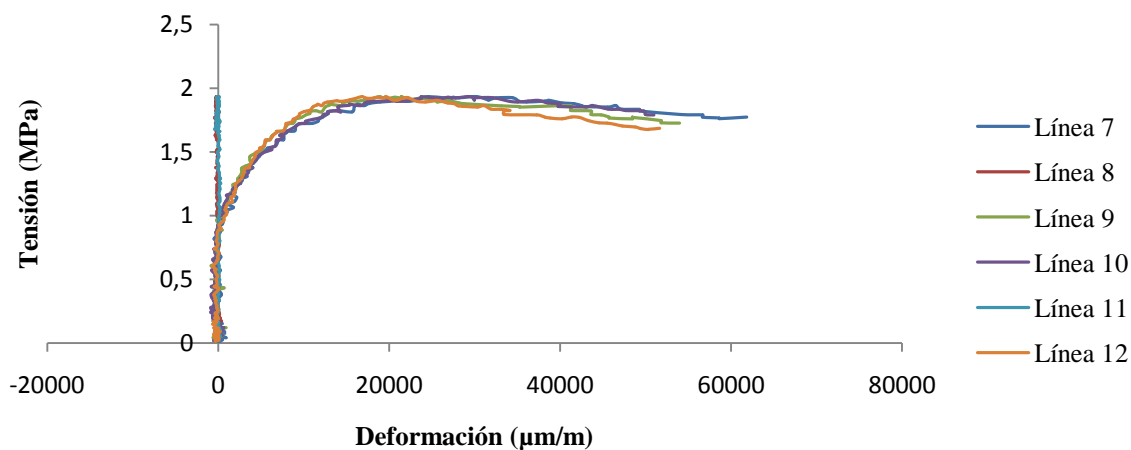


Figura 6.2. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C3

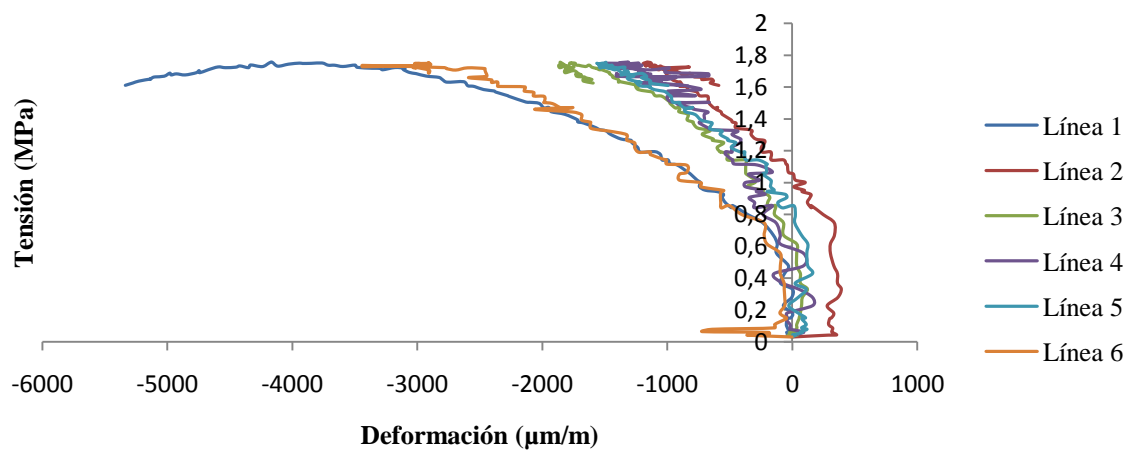


Figura 6.3. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C4

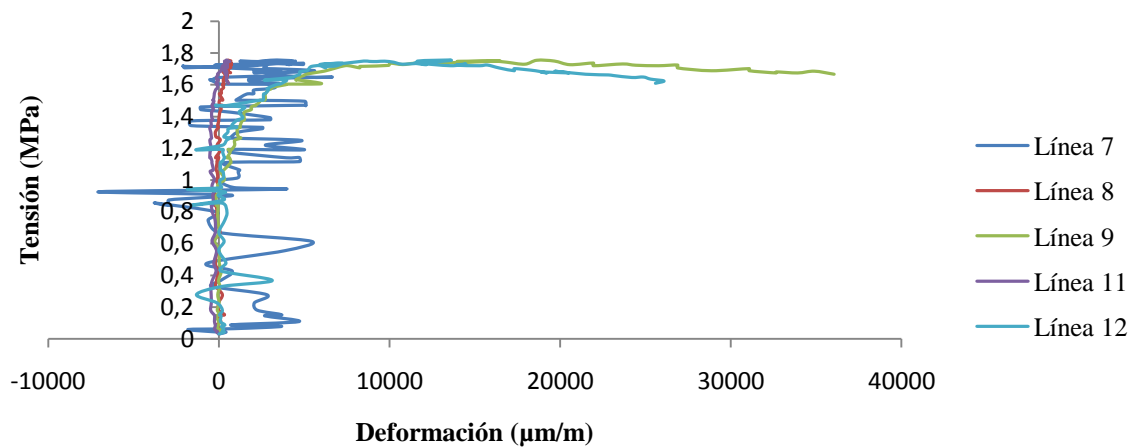


Figura 6.4. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C4

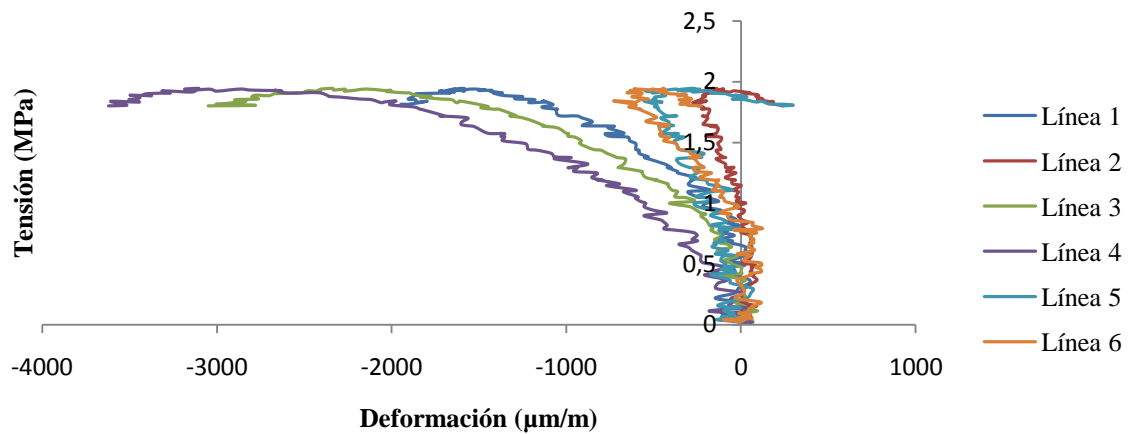


Figura 6.5. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C5

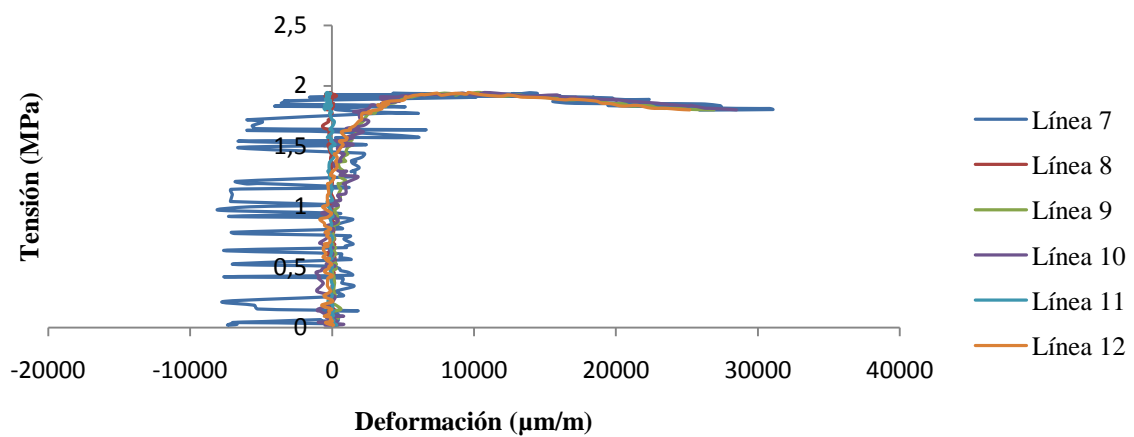


Figura 6.6. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C5

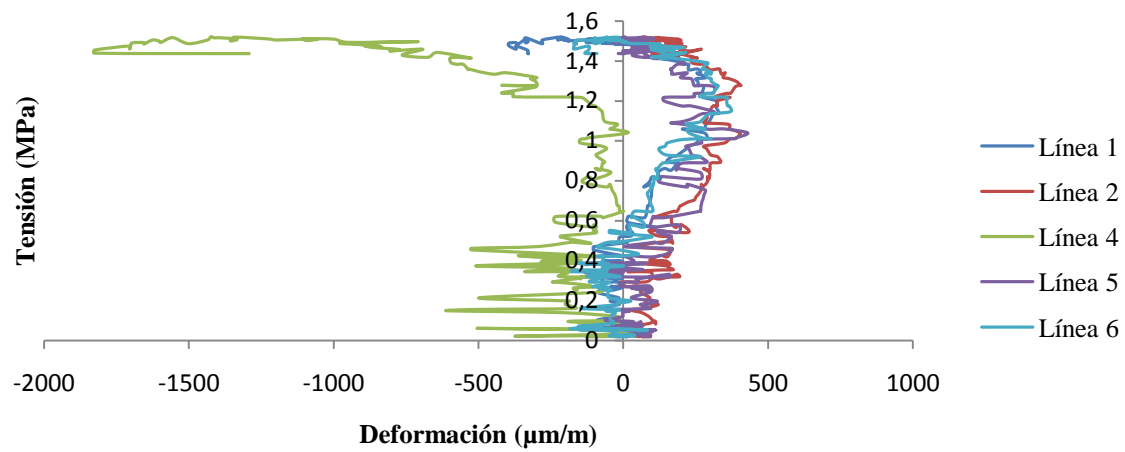


Figura 6.7. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C9

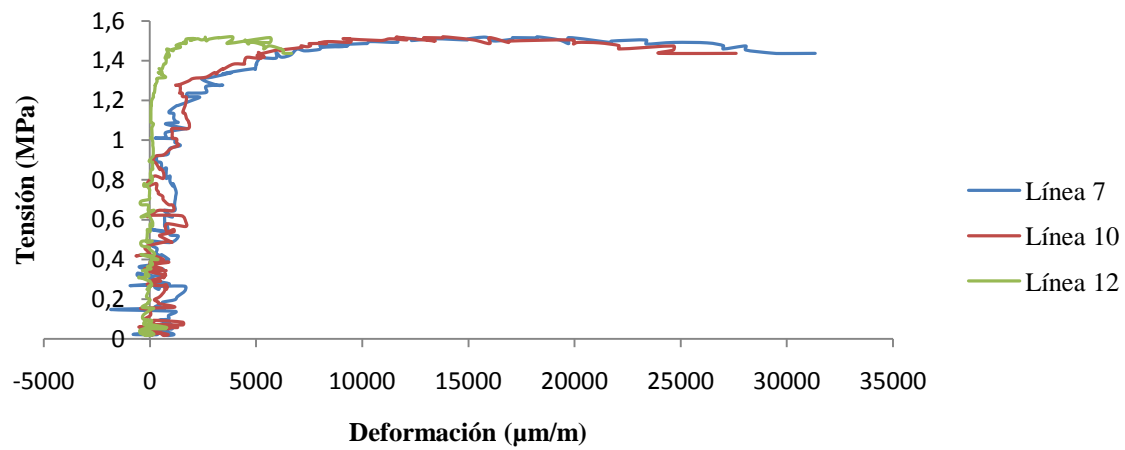


Figura 6.8. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C9

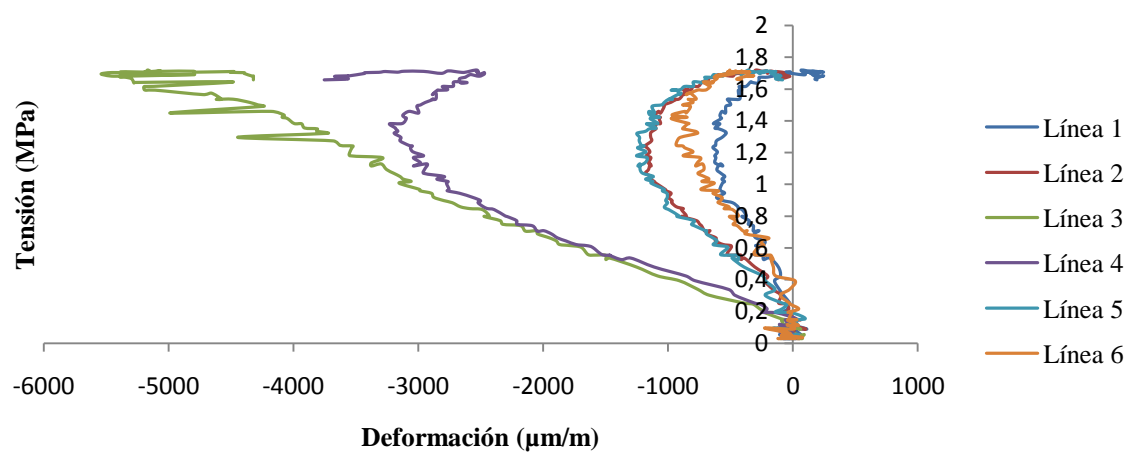


Figura 6.9. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de C11

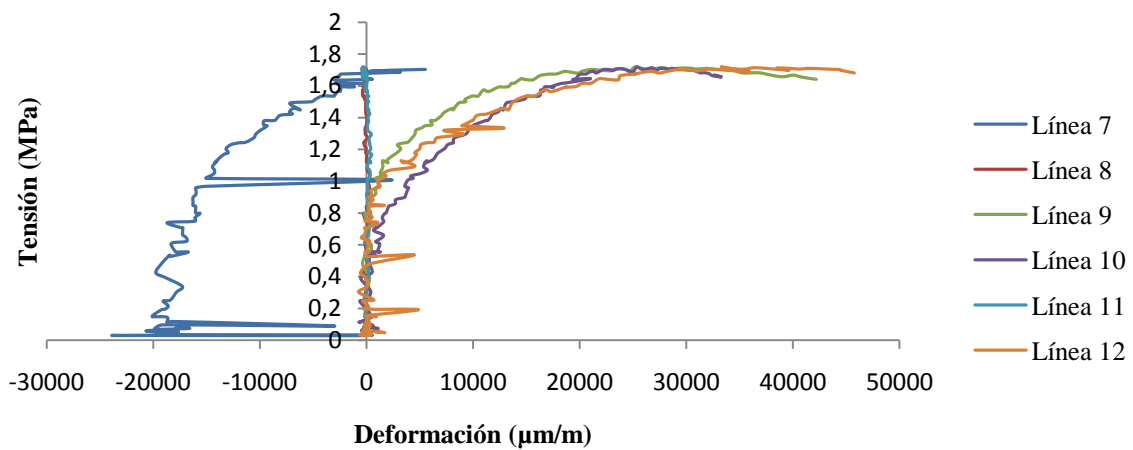


Figura 6.10. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de C11

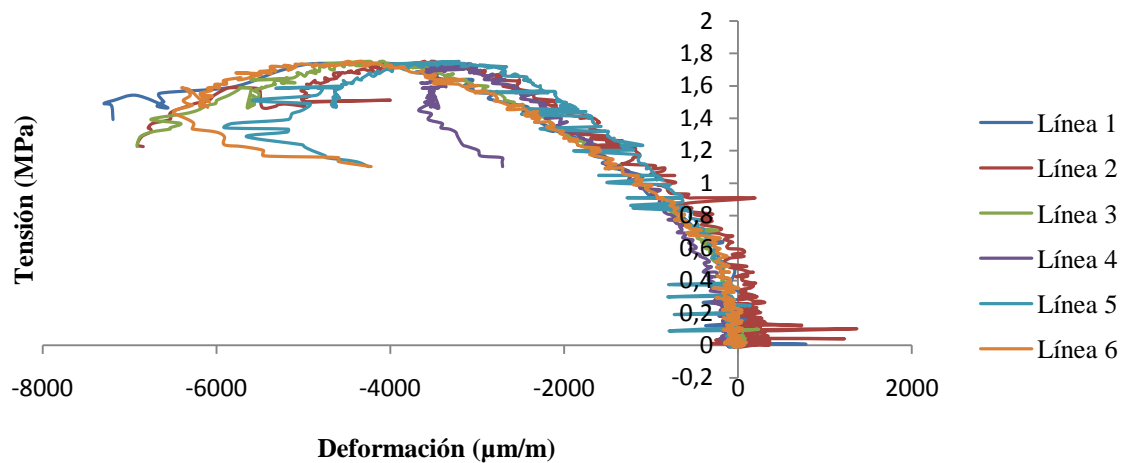


Figura 6.11. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de CP2

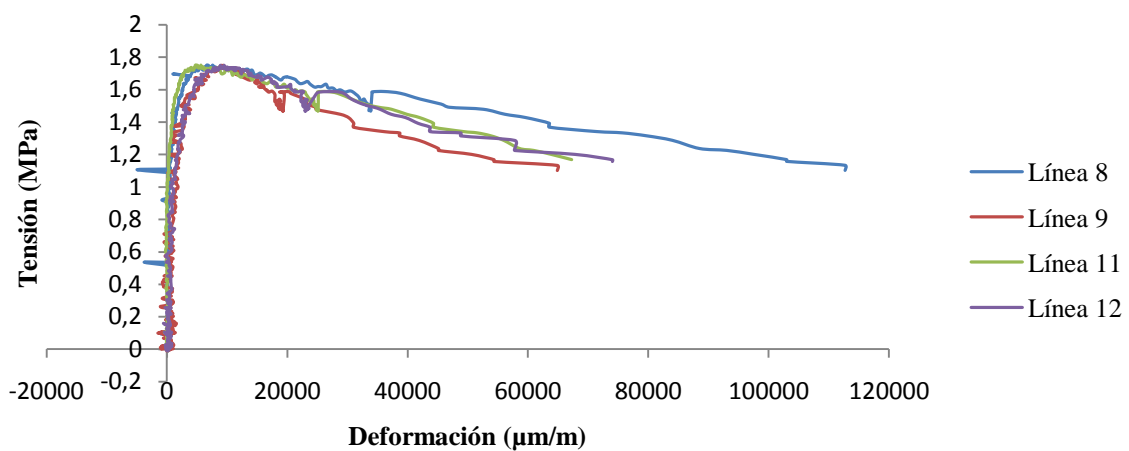


Figura 6.12. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de CP2

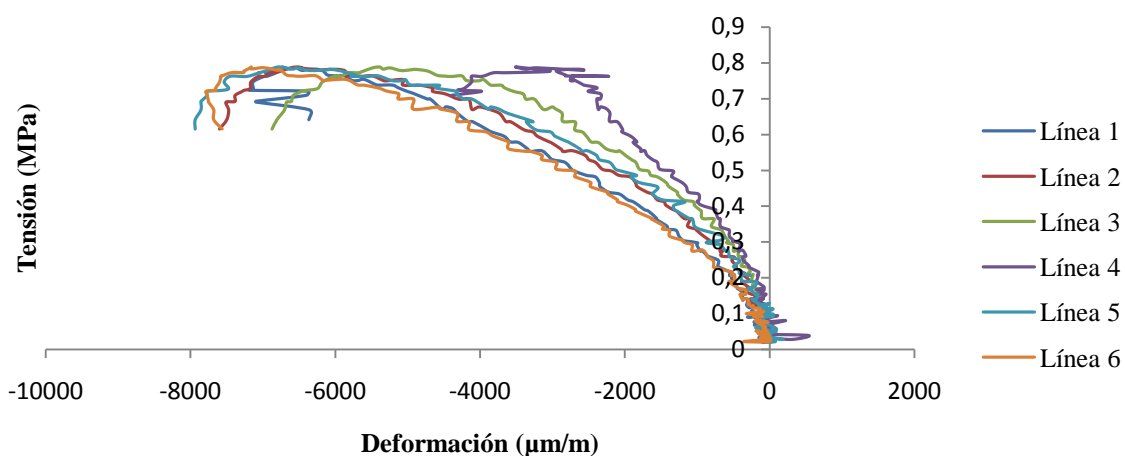


Figura 6.13. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P5

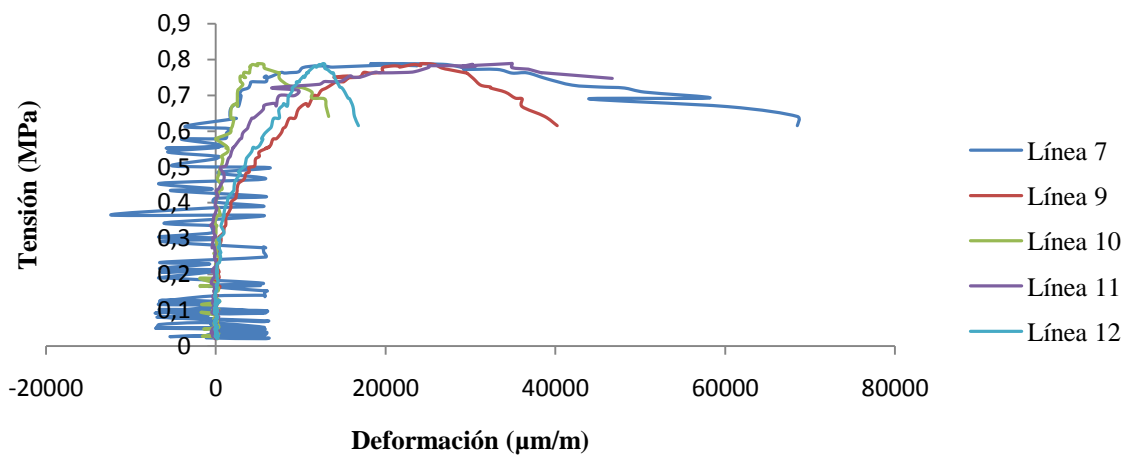


Figura 6.14. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P5

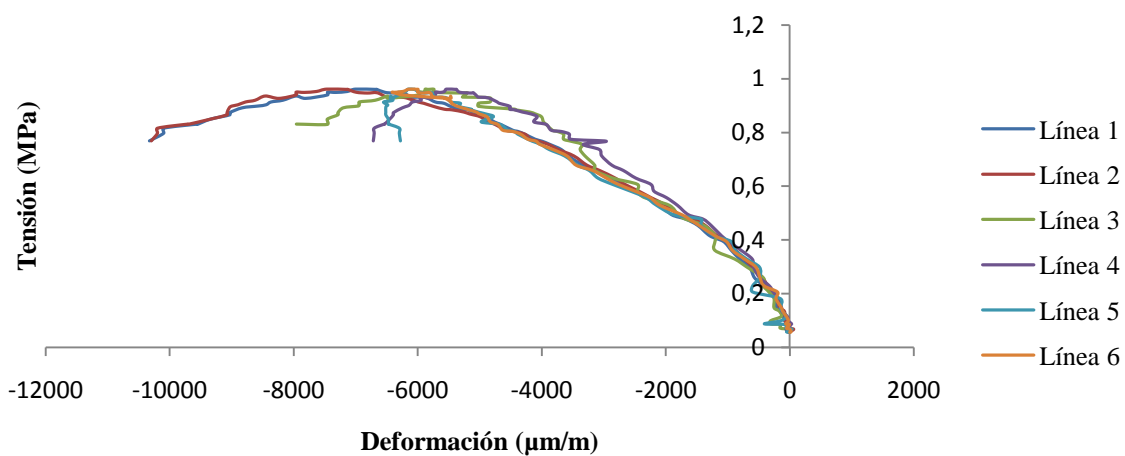


Figura 6.15. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P8

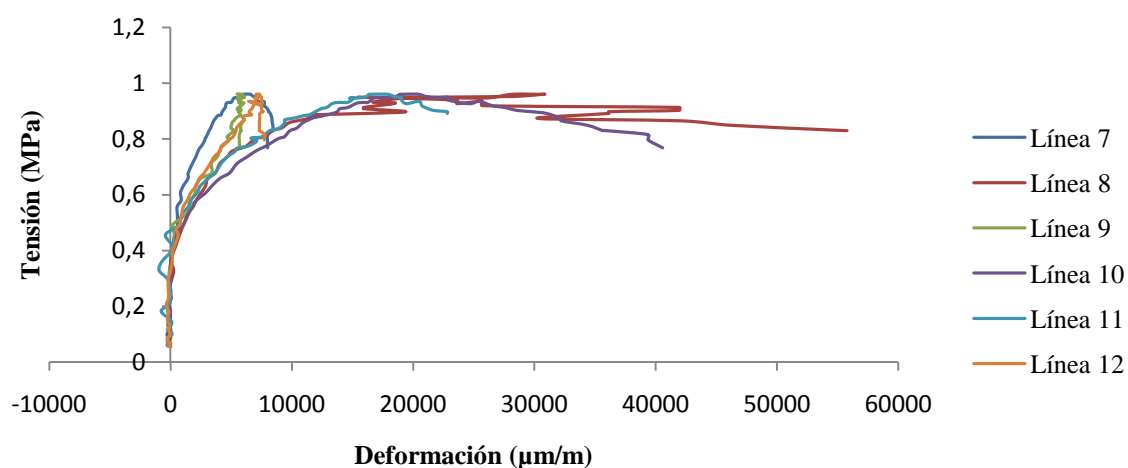


Figura 6.16. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P8

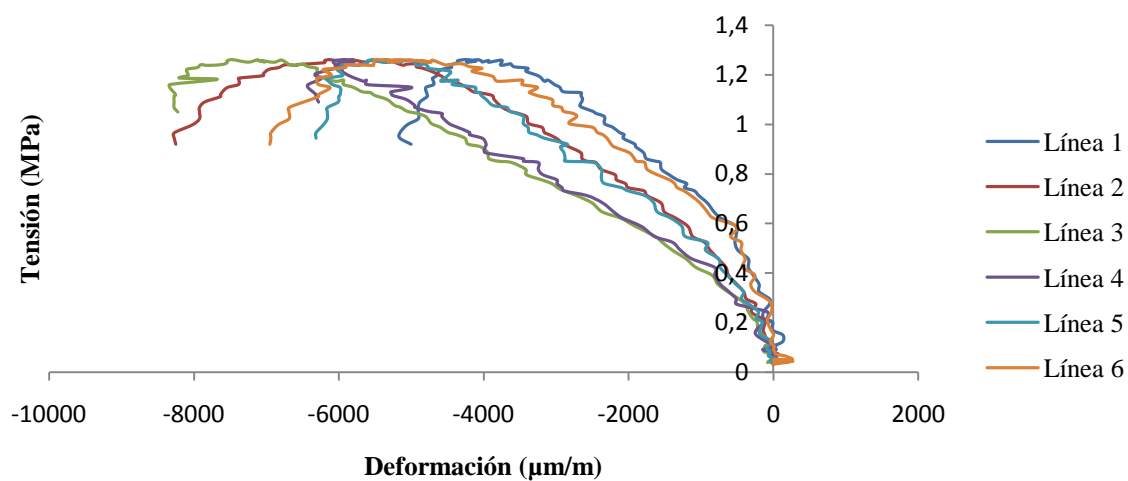


Figura 6.17. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P10

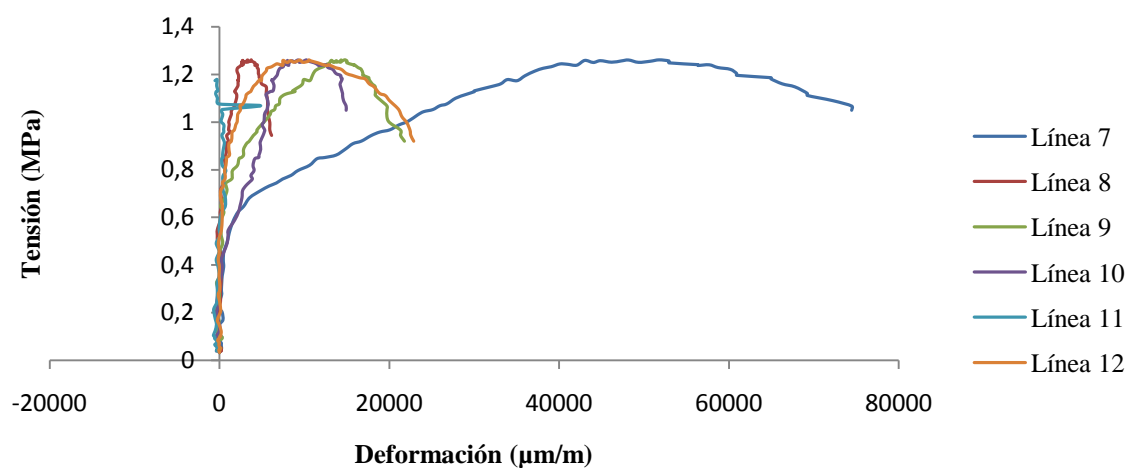


Figura 6.18. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P10

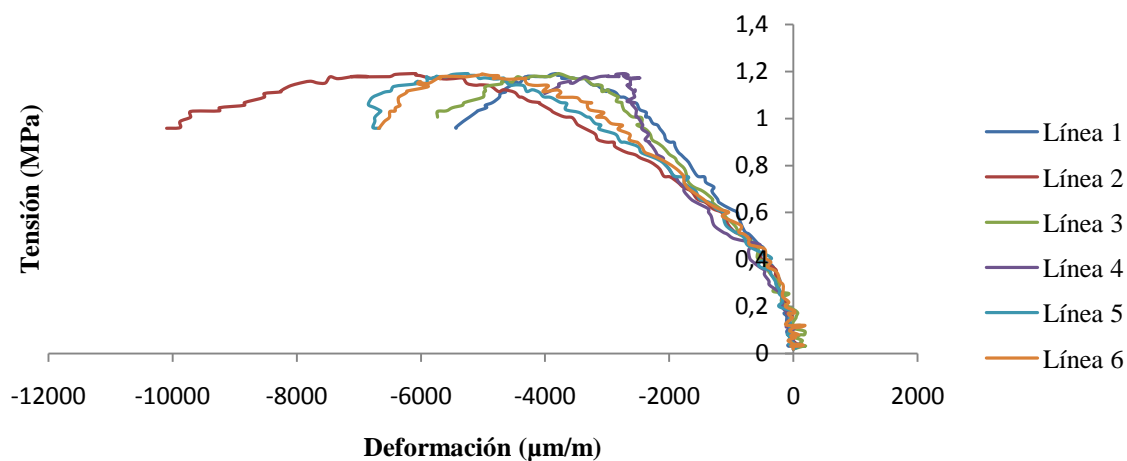


Figura 6.19. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P11

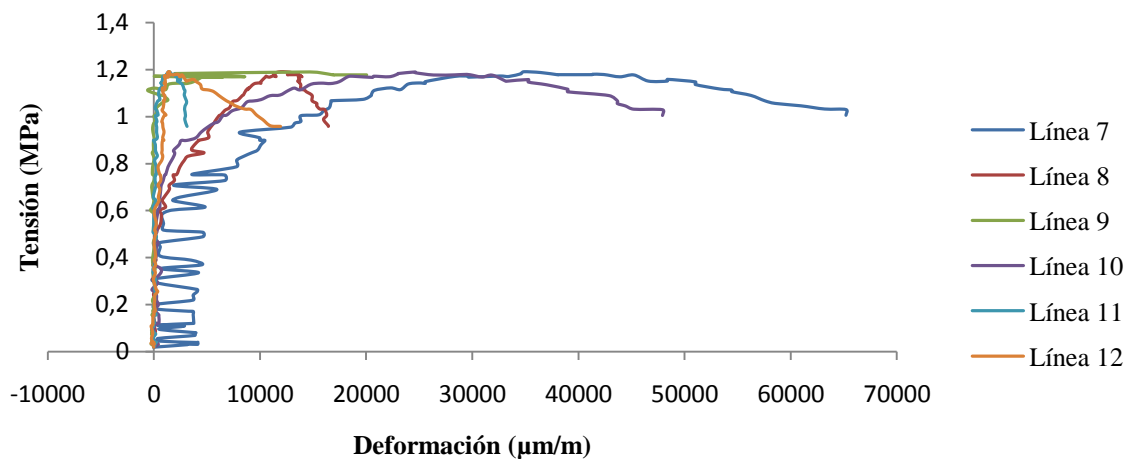


Figura 6.20. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P11

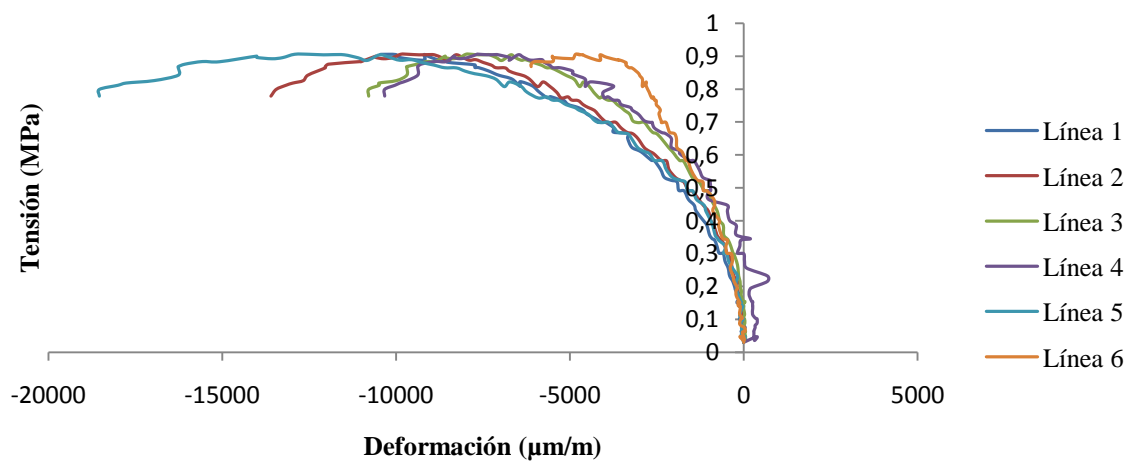


Figura 6.21. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P12

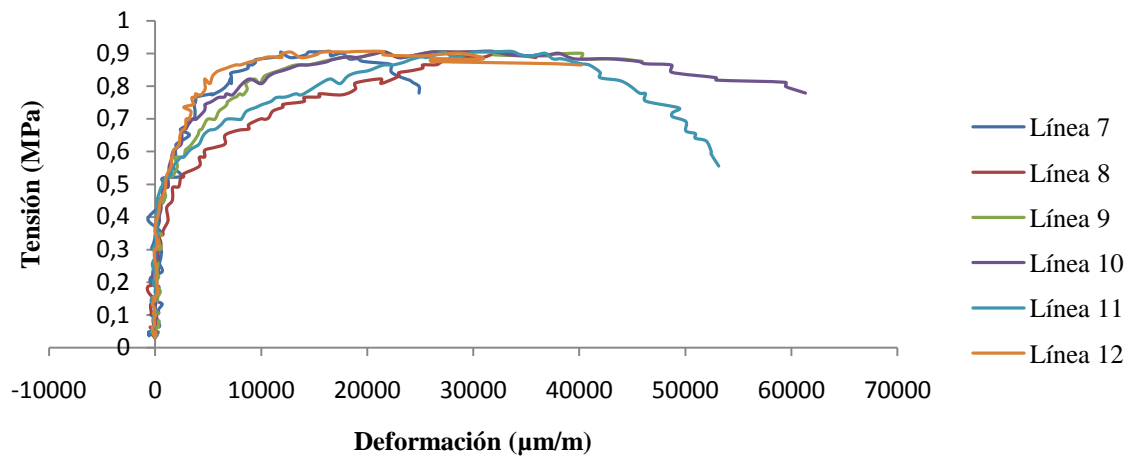


Figura 6.22. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P12

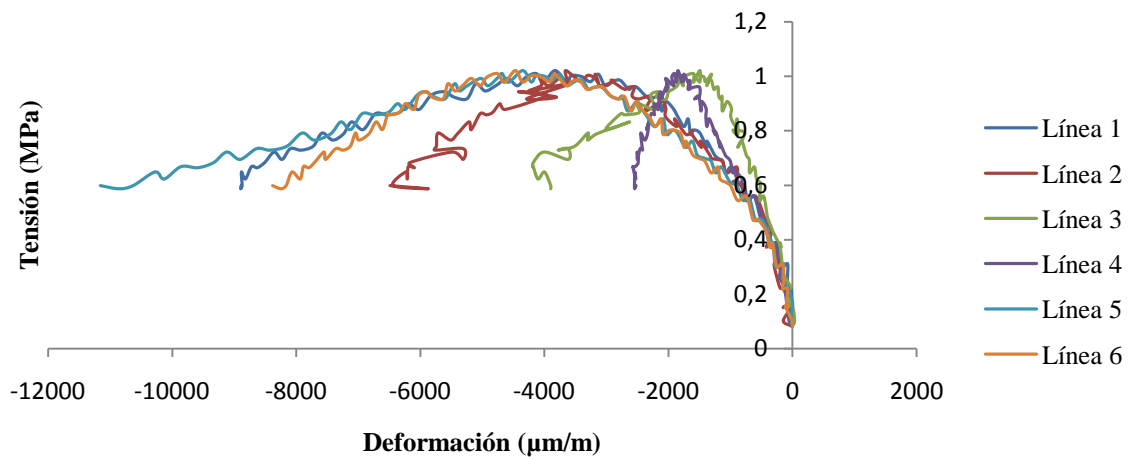


Figura 6.23. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P15

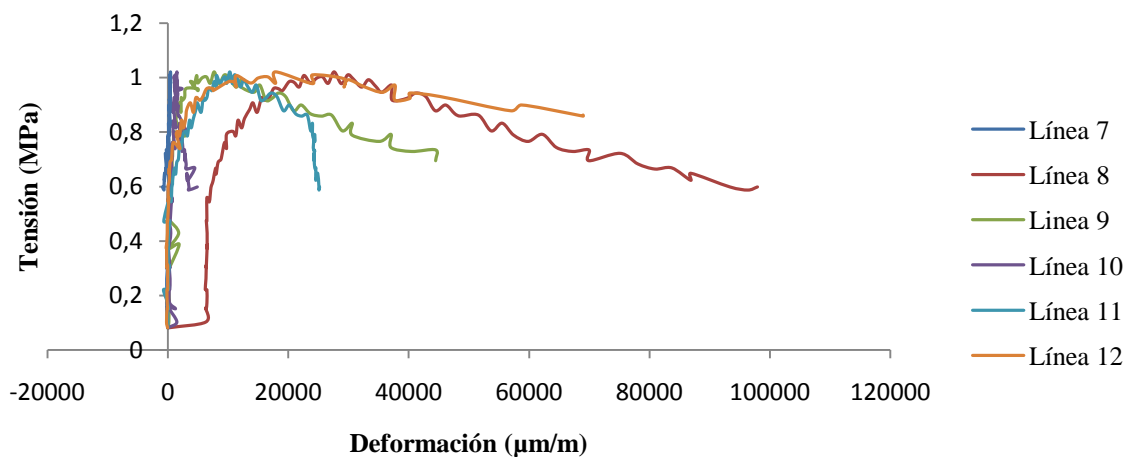


Figura 6.24. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P15

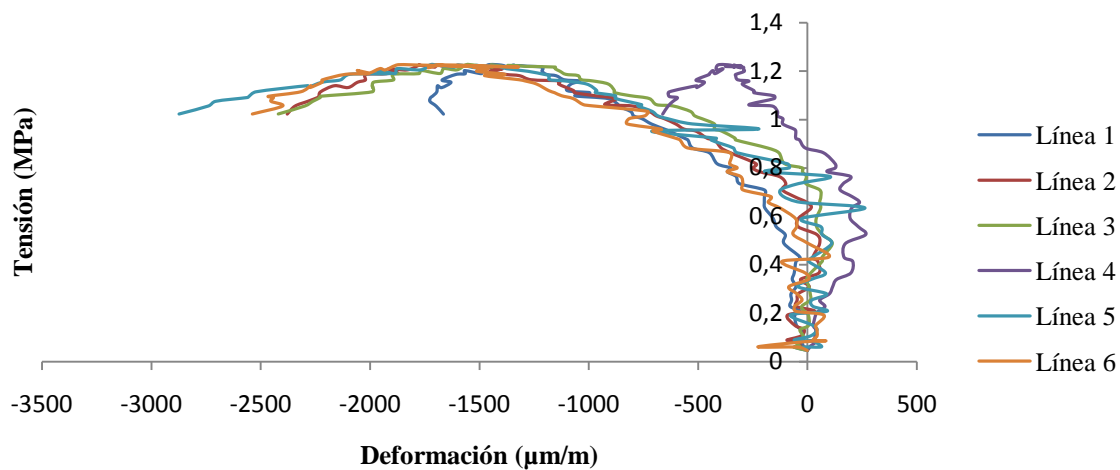


Figura 6.25. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P17

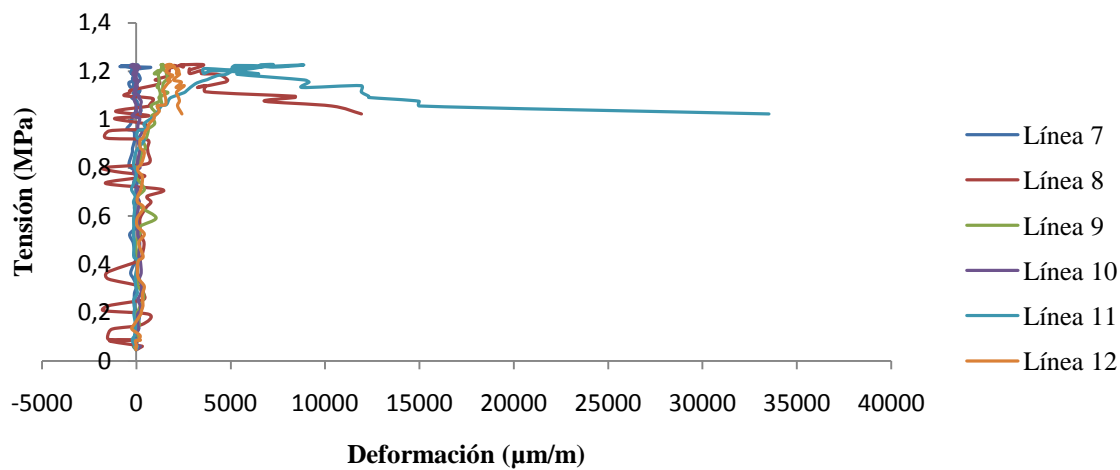


Figura 6.26. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P17

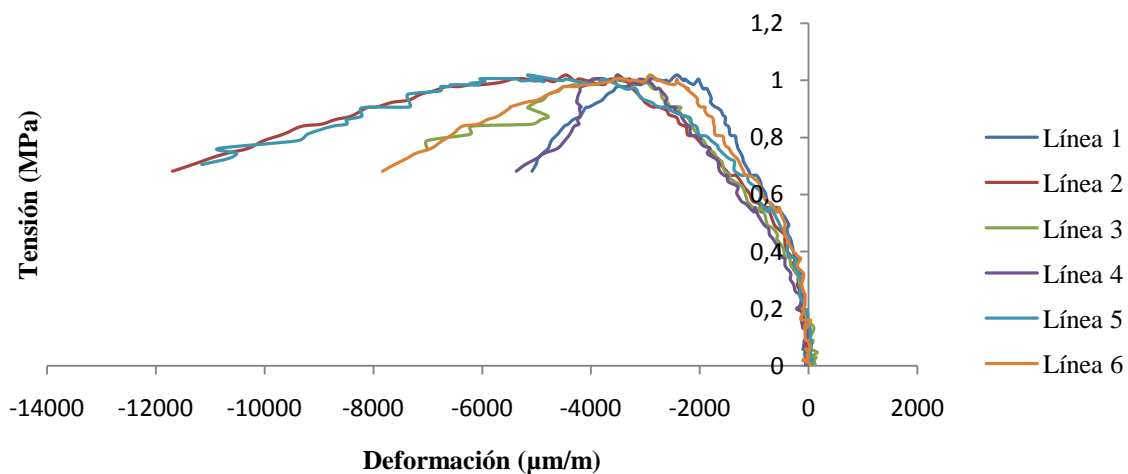


Figura 6.27. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas longitudinales de P19

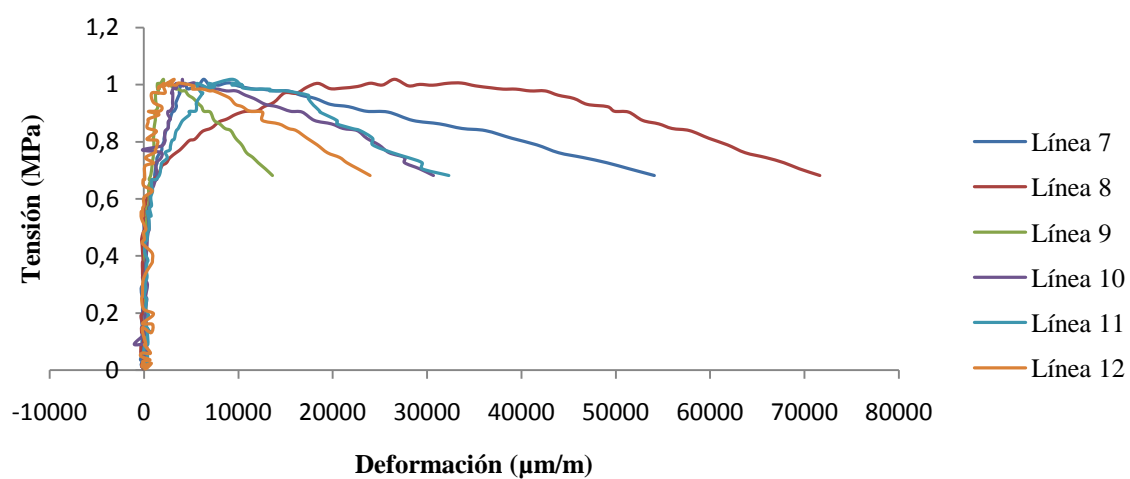


Figura 6.28. Curvas tensión-deformación según DIC de líneas transversales de P19

REFERENCIAS

- [1] F.Font y P.Hidalgo, *Arquitecturas de tapia*. Castellón: Colegio Oficial de Aparejadores y Técnicos de Castellón. 2009.
- [2] Gernot Minke, *Manual de construcción en tierra: la tierra como material de construcción y su aplicación en la arquitectura actual*. 2º ed. Montevideo. 2005.
- [3] Mileto, Camila y Fernando Vegas, *La restauración de la tapia en la Península Ibérica: criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia. 2014.
- [4] Walker, Peter, Rowland Keable, Joe Martin y Vasilios Maniatidis, *Rammed Earth. Design and construction guidelines*. Watford: BRE bookshop. 2005.
- [5] Walker and Peter, *The Australian Earth building handbook*. Sydney: Standards Australia International. 2001.
- [6] Bauluz, Gonzalo y Pilar Bárcena, *Bases para el diseño y construcción con tapia*. Madrid: Ministerio de Obras Públicas y Transportes Centro de Publicaciones. 1992.
- [7] F. Font y P. Hidalgo, *La Tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos*. Informes de la construcción. Vol. 63, 523, 21-34, 2011.
- [8] S. Bestraten, E. Hormías, A. Altemir, *Construcción con tierra en el siglo XXI* Vol. 63, 523, 5-20, 2011.
- [9] N. Afanador, M. Carrascal, M. Bayona, *Experimentación, comportamiento y modelización de la tapia pisada*. Revista Facultad de Ingeniería UPTC. Vol. 22, Nº 35, 2013.
- [10] P. Doat, A. Hays, H. Houben, S. Matuk, F. Vitoux, *Construire en Terre*. 1979.
- [11] UNE 41410, *Bloques de tierra comprimida para muros y tabiques*. 2008.
- [12] UNE 103:101:1995, *Análisis Granuométrico de Suelos por Tamizado*. AENOR, 2002.
- [13] UNE 7050-2, *Tamices y tamizado de ensayo*. 1997.
- [14] UNE 103:102, *Análisis de suelos fino por sedimentación*. 1995.
- [15] UNE 103-105, *Ensayo de Compactación. Próctor Normal*. 1994.
- [16] UNE 103-300, *Determinación de la humedad de un suelo mediante secado en estufa*. 1993.
- [17] UNE-EN 12504-4, *Ensayos de hormigón en estructuras*. 2004.